

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Казанский государственный энергетический университет»

На правах рукописи



Зиганшин Малик Гарифович

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНЫХ КРИТЕРИАЛЬНЫХ
ОЦЕНОК ЭФФЕКТИВНОСТИ И СПОСОБОВ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ПЫЛЕГАЗООЧИСТНЫХ АГРЕГАТОВ ТЭС**

Специальность 05.14.14 Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты

Диссертация на соискание ученой степени доктора
технических наук

Научный консультант доктор хим. наук, проф. Чичирова Н.Д.

Казань – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Сравнительный анализ соответствия современным нормативам теоретической базы оценок способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую атмосферу	22
1.1 Установление системных взаимосвязей и приоритетов в исследованиях процессов обработки выбросов генерирующих предприятий с позиции обеспечения современных нормативов	22
1.1.1 Характерные для единого технологического цикла производства тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях параметры газовых выбросов и общая оценка процессов их очистной обработки.....	22
1.1.2 Сравнительная оценка количества и состава вентиляционных выбросов по котельному и турбинному залам, бункерному и зольному помещениям главного здания ТЭС, помещениям РУ, КРУЭ, в соответствии с современной нормативной базой по ТЭС	34
1.1.3 Инфографическое моделирование структурных взаимосвязей способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду	41
1.1.4 Теоретическая база методов классификации загрязнителей и выбросов, характерных для единого производственного цикла тепловых электростанций	49
1.1.5 Общая характеристика принципов газоочистки и пылезолоосаждения	54
1.2 Теоретическая база методов определения предельно допустимого выброса (ПДВ) производственных объектов ТЭС.....	61
1.2.1 Методы определения нормативов загрязнения атмосферного воздуха компонентами производственных выбросов ТЭС в России, ЕС и США	64
1.2.2 Методы определения ПДВ источников выброса дымовых газов и других источников производственных выбросов ТЭС	69
1.3 Теоретическая база существующих методов проектирования основных типов устройств очистки выбросов ТЭС	73
1.3.1 Выбор исходных параметров для проектирования. Упрощения характеристик выбросов, приемлемые для продуктов сгорания газообразного и твердого топлива на ТЭС	73
1.3.2 Определение эффективности золоулавливающих и газоочистных аппаратов.....	78
1.3.3 Анализ существующих методов расчетов инерционных золоуловителей.....	84
1.3.4 Осаждение частиц золы на решетках и др. неподвижных препятствиях.....	97
1.3.5 Анализ применимости конденсационных, сорбционных и термических методов к дегалогенизационной очистной обработке газоздушных потоков производственных помещений с КРУЭ	106
1.3.6 Анализ способов очистной обработки выбросов с целью десульфуризации продуктов сгорания твердого топлива	114
2 Теоретические основы совершенствования конструирования систем очистки выбросов теплоэнергетических объектов в соответствии с современными нормативами	122
2.1 Совершенствование оценок эффективности систем очистки выбросов от производственных объектов генерирующих предприятий	122
2.1.1 Санитарно – гигиенические оценки соответствия неизотермических выбросов из высоких источников (дымовых труб ТЭС).....	122
2.1.2 Оценка энергоэкологической эффективности систем очистки выбросов с парниковыми газами	127
2.2 Совершенствование расчетов ПДВ для высоких источников (дымовых труб ТЭС)	138

2.3	Совершенствование теоретической базы расчетов сепарации мультифазных выбросов производственных объектов теплоэнергетики	142
2.3.1	Математическое моделирование инерционной сепарации взвешенной части дымовых газов	142
2.3.2	Сепарация частиц золы на препятствиях	165
2.4	Совершенствование расчетов конденсационной обработки выбросов помещений КРУЭ для удаления галогенсодержащего компонента SF₆	167
2.5	Совершенствование теоретической базы расчетов сорбционной обработки выбросов помещений КРУЭ с галогенсодержащими загрязнителями	174
2.5.1	Анализ термодинамических закономерностей процесса сорбции.....	174
2.5.2	Уточнение решения задачи о нулевых колебаниях для использования в расчетах параметров сорбционной обработки галогенсодержащих выбросов помещений КРУЭ ...	190
2.5.3	Учет уточнения решения задачи о дисперсионных силах в расчетах фонтанирующего режима полидисперсного материала для десульфуризации и других процессов чистых технологий угольной генерации	203
2.5.4	Параметры термообработки галогенсодержащих загрязнителей выбросов помещений КРУЭ.....	214
2.5.5	Комплексная обработка выбросов помещений КРУЭ с галогенсодержащими веществами	224
3	Верификация результатов теоретических исследований по очистной обработке производственных выбросов ТЭС. Сравнение с данными численных исследований.....	227
3.1	Расчеты движения гомогенных и гетерогенных потоков дымовых газов и производственных выбросов ТЭС на основе комплексов CFD	227
3.1.1	Выбор математической модели численных расчетов гомогенного потока выбросов	227
3.1.2	Выбор математической модели численных расчетов гетерогенного потока выбросов.....	231
3.1.3	Проверка корреляции значения Re _r со степенью осаждения частиц золы из потоков выбросов в аппаратах с завихрительными устройствами	235
3.1.4	Проверка возможности использования числа Re _r при инерционном осаждении частиц золы на препятствие из обтекающего потока	243
3.2	Оценки поверхностного взаимодействия частицы золы и препятствия после касания (зацепления).....	257
3.2.1	Учет вандерваальсового взаимодействия при касании препятствия взвешенной в потоке частицей золы	261
3.2.2	Учет влияния упрощений, введенных в задачу о нулевых колебаниях, на корректность ее решения.....	272
3.2.3	Вклады различных видов взаимодействий в захват препятствием частиц золы. Зависимость величины вклада от электростатических характеристик золы и пыли	274
3.3	Расчеты высоты начального подъема струи над высоким источником – дымовой трубой ТЭС.....	279
4	Опытные исследования адсорбционного и термического узлов системы комплексной обработки выбросов помещений КРУЭ с загрязнителями глобального действия – галогенсодержащими веществами	290
4.1	Опытное исследование режимов фонтанирования полидисперсного адсорбента в узле адсорбционной обработки выбросов	290

4.1.1	Сравнение с существующими исследованиями фонтанирования монодисперсных материалов	290
4.1.2	Опытное определение характеристик фонтанирования полифракционного материала	294
4.2	Результаты опытных исследований горелочных устройств узла термической обработки выбросов помещений КРУЭ и методика расчета систем термообработки...	306
4.3	Полуэмпирическая модель образования автослоя в процессах сепарации частиц золы на элементах пористого слоя из сеточных (тканых) материалов.....	315
5	Экономическая оценка предотвращенного ущерба от вредных компонентов выбросов ТЭС. Анализ рисков инвестиций в теплоисточники. Использование результатов исследований в проектировании и учебной работе	322
5.1	Расчеты предотвращенного ущерба от снижения выброса NO_x, НМЛОС и СО. Общие положения	322
5.1.1	Комплексная обработка выбросов помещений КРУЭ с галогенсодержащим загрязнителем.	327
5.1.2	Фонтанирующий слой в процессе хемосорбции галогенсодержащих загрязнителей вентиляционных выбросов помещений КРУЭ ТЭС	334
5.1.3	Анализ базовой линии и условия дополненности по ПСО комплексной обработки выбросов помещений КРУЭ с галогенсодержащими загрязнителями	339
5.1.4	Обработка выбросов с косвенными парниковыми газами (НМЛОС и СО)	345
5.2	Методика расчета комплексных энергоэкологических показателей источников выбросов теплоэнергетики и экологических рисков при наличии парниковых газов. Общие положения	350
5.2.1	Выбор системы отопления на базе комплексных энергоэкологических показателей источника теплоснабжения с учетом выброса парниковых газов и экологических рисков инвестиций.....	362
5.2.2	Комплексные энергоэкологические и экономические оценки соответствия источника выброса парниковых газов – теплогенератора на газовом топливе. Экологические риски инвестиций в газоснабжение	367
5.3	Использование результатов исследований в проектировании и учебной работе	372
	ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	374
	СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	378
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	396
	Приложение П1. Использование безразмерного комплекса Re_r для прямоточно-вихревого сепаратора (ПВС) с тангенциальным вводом.....	396
	Приложение П2. Решение задачи о нулевых колебаниях гармонических осцилляторов с разложением биномов $(1 \pm \lambda)^{1/2}$ в степенной ряд	406
	Приложение П3. Определение параметров термообработки на основе самосогласованных коэффициентов избытка воздуха.....	411
	Приложение П4. Значения чисел Stk и Re_r при скорости невозмущенного потока 0,03...30 м/с для частиц диаметром $(0,5 \dots 500) \cdot 10^{-6}$ м.....	414
	Приложение П5. Результаты расчетов высоты начального подъема струи над источником выбросов.....	417
	Приложение П6. Схема термообработки выбросов, содержащих НМЛОС, г. Санкт-Петербург (Ленинград).....	421
	Приложение П7. Система комплексной очистки галогенсодержащего выброса.....	422
	Приложение П8. Внедрение результатов исследований.....	427

ВВЕДЕНИЕ

Общие характеристики и актуальность проблем оценки энергетической и экологической эффективности объектов теплоэнергетики

В последнее время в России заметно проявление государственного интереса к росту производственного потенциала и к снижению энергозатрат на его функционирование. Отношения по энергосбережению и повышению энергетической эффективности регулируются Федеральным законом № 261-ФЗ [1]. Ряд его положений непосредственно относится к деятельности ТЭК, в т.ч. объектов теплоэнергетики и др. промышленных топливоиспользующих систем.

В соответствии со ст. 4 [1], принципы правового регулирования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности учитывают как меры достижения непосредственно энергосбережения и эффективности использования топлива (стимулирование, системность, комплексность), так и производственно-технологические, экологические и социальные условия, чем налагается запрет на безмерное сокращение потребления топливных ресурсов.

Установление требований к энергетической эффективности зданий, строений, сооружений ТЭС и промышленных топливоиспользующих систем, обязанности проведения ими энергетического обследования, является, в соответствии со ст. 9 [1], прерогативой государственного регулирования в сфере энергосбережения. С учетом того, что направление повышения энергетической эффективности должно стать системообразующим и пронизывать все остальные приоритеты технологической модернизации России, становится очевидным, что на сегодня это самая приоритетная и главнейшая прерогатива государственного регулирования в сфере роста производственного потенциала страны. Это и тренд развития РФ на ближайшее будущее, ввиду чего исследования в данном государственно важном направлении, становятся весьма актуальными – они особо востребованы сегодня, и останутся таковыми в обозримом будущем. При этом последнее – не абстрактный тезис. Положения [1] позволяют утверждать, что принятое в данной работе направление исследований не потеряет актуальности и в более отдаленной перспективе: пунктом 2.3 ст. 11 предписывается регулярный (не реже чем один раз в пять лет) пересмотр требований энергетической эффективности объектов в целях ее повышения. Выполнение этой позиции Федерального закона [1] немислимо без постоянной ревизии текущих способов энергосбережения, непрерывного научного поиска и нахождения новых путей достижения энергоэффективности.

Представленная работа содержит теоретические исследования и разработки в плане поиска оптимальных функционально-технологических, конструктивных и инженерно-

технических решений (ст. 11, п.п. 2.2, 7 [1]) по оптимизации технологий подготовки и сжигания топлива, по очистке выбросов ТЭС. В соответствии со ст. 11 [1], требования энергетической эффективности зданий, строений, сооружений теплоэнергетических и промышленных топливоиспользующих систем должны включать в себя показатели, характеризующие удельную величину расхода энергетических ресурсов, с обязательным включением требований и к функционально-технологическим, и к инженерно-техническим решениям, используемым в зданиях, строениях, сооружениях, влияющим на энергетическую эффективность объектов.

Показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности должны быть утверждены также, в соответствии со ст. 14 [1], и в составе показателей оценки эффективности деятельности органов исполнительной власти субъектов РФ, местных органов. Между тем, как отмечается на сайте <http://www.energy2020.ru> научно-экспертного совета при рабочей группе Совета Федерации по мониторингу практики применения Федерального закона № 261-ФЗ, такие показатели недостаточную отработаны: «...чтобы сосредоточиться на решении конкретных задач, необходима реально работающая законодательная база, требуется пересмотр и доработка многих действующих норм и разработка новых, действенных нормативных актов...». Такого же мнения практики и специалисты, реализующие законодательные нормы на местах. Одной из целей нашей работы также является разработка прозрачных и практически применимых на уровнях энергетических предприятий, субъектов РФ, межгосударственных отношений оценочных комплексных показателей очистной обработки выбросов в теплоэнергетических системах, включающих показатели их энергетической и экологической эффективности. Повышение энергетической эффективности экономики субъектов РФ предполагает, в частности (ст. 14 п. 4.5 [1]) увеличение количества случаев использования объектов, имеющих высокую энергетическую эффективность, что должно быть отражено в их целевых показателях по энергосбережению и повышению энергетической эффективности. В связи с этим показатели, разработанные в данном исследовании, включены в государственные документы на уровне субъекта РФ – Республики Татарстан, в качестве рекомендованных к использованию и используются как объективные оценочные показатели на уровне отдельных производственных объектов, имеющих теплоэнергетические устройства.

В РТ проводится достаточно интенсивная деятельность по обеспечению фундаментальной научно-исследовательской базы решения проблем энергосбережения и повышения энергетической эффективности. С 2011 г. действует Соглашение о научно-техническом сотрудничестве между СО РАН и Правительством РТ в плане развития кооперации между научными учреждениями, включающее такие направления деятельности, как применение высоких, экологически чистых и энергосберегающих технологий.

Председатель Научно-координационного совета по энергосбережению СО РАН, чл.-корр. РАН С. Алексеенко отмечает, что энергоемкость ВВП России более чем в 3 раза выше такого же показателя ЕС, более чем в 2 раза – США и более чем в 3,5 раза – Японии ([2]). По его оценке, чрезмерная энергоемкость ВВП делает национальную экономику неэффективной настолько, что даже ставит под сомнение реализацию темпов роста ВВП, запланированных до 2020 г. Между тем, по экспертным оценкам СО РАН, Россия обладает гигантским потенциалом энергосбережения в 400-500 млн т у. т. в год (более 40 % общего энергопотребления). и одна треть его сосредоточена в отраслях ТЭК. Развитие на ТЭС современных угольных технологий с решением всех сопутствующих экологических проблем отнесены председателем совета СО РАН по энергосбережению к жизненно важным. В числе перспективных технологий отмечены котлы со сжиганием угля в циркулирующем кипящем слое, ПГУ с газификацией угля и др., входящие в комплект технологий типа Clean Coal Technology в США. Исследованные в данной диссертационной работе установки с циркуляционным (фонтанирующим) слоем, могут использоваться как по своему основному назначению хемосорбционного реактора для сжигания угля со связывающими серу присадками непосредственно в топке котлоагрегата, так и на предварительной стадии подготовки угля для его сушки и газификации.

Еще одна группа проблем, решаемых в представленной работе, связана с очистной обработкой вытяжного воздуха производственных помещений теплоэнергетических объектов. Здесь можно выделить, как минимум, 3 аспекта ее необходимости непосредственно для надлежащего (энергоэффективного, надежного и безопасного) проведения единого технологического цикла производства тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях. Один из этих аспектов относится к обезвреживанию рециркуляционного воздуха в системах с энергосбережением, второй – к улову вредных веществ вентиляционных выбросов из помещений с пылящим или выделяющим вредные газы оборудованием, и третий – к обеспечению гигиенических нормативов чистоты воздуха на станции. Последнее жизненно важно для персонала станции, в т.ч. для его способности надлежащего исполнения должностных функций, от чего зависит качество жизни и безопасность проживания населения.

Качество очистки воздуха и газов – один из основных факторов, непосредственно влияющих и на существование человечества как вида, и на жизнь отдельного индивидуума. Известно, что клетки человеческого организма за десятилетний период жизни практически полностью обновляются. Ввиду этого функционирование всех его органов (в т.ч. обеспечивающих способность к труду и другим, позволяющих отличать *homo sapiens* от иных видов) в каждый данный момент непосредственно зависит и от состояния воздуха, которым он дышал последнее десятилетие. Поэтому заметно возрастает значение разработок по

совершенствованию систем очистной подготовки и поддержания требуемой чистоты воздуха в рабочей зоне объектов ТЭК. Вместе с тем большее время качество вдыхаемого человеком воздуха, и через это – качество его существования, включая возможность производительно трудиться, во многом зависит теперь от эффективности и совершенства систем обработки производственных выбросов. При этом следует отметить, что представление об очистной обработке выбросов как исключительно о пылезолоочистке, еще бытующее иногда даже в кругах специалистов, могло казаться состоятельным в середине прошлого века. В настоящее время при создании очистных систем необходимо учитывать весь комплекс присутствующих ингредиентов. Уже нельзя принимать устройство, функционирующее только как золоуловитель, за средство очистки дымовых газов; абсурдны и средства обезвреживания токсичных газов, приводящие к образованию и выбросу конденсированных загрязнителей.

Некоторые из удаляемых в атмосферу ингредиентов выбросов не воздействуют непосредственно на организм человека, но они могут оказывать глобальное воздействие на климат планеты, разрушая озоновый слой или создавая парниковый эффект и ставя тем самым под сомнение возможность существования человечества. Проблема совершенствования схем и технологий обработки выбросов, конструкций аппаратов и устройств пылегазоочистных агрегатов ТЭС приобрела ряд новых черт, которые уже невозможно игнорировать ввиду их непосредственного действия на жизнь каждого человека и человечества в целом. На сегодня, в т.ч. в связи с членством в ВТО, становится необходимостью оценка совершенства схем и устройств очистки выбросов по загрязнителям глобального действия из списков Монреальского протокола 1987 г. с изм. от 29.06.90г. (озоноразрушающим веществам, далее – ОРВ), и не регулируемых Монреальским протоколом (список РКИК ООН по парниковым газам, далее – ПГ), Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях" (далее – СОЗ; Федеральный закон от 27.06.2011 № 164-ФЗ). В этих списках фигурирует и несколько веществ из присутствующих в выбросах предприятий теплоэнергетики, в т.ч. считавшийся нейтральным диоксид углерода и в ряде случаев – соединения галогенов, например, гексафторид серы, диоксины и фураны. Теперь эти вещества, а также метан и в определенной мере оксиды азота и оксид углерода (т.наз. газы-предшественники тропосферного озона, *ozone precursor gases*) необходимо учитывать как загрязнители глобального действия, оказывающие соответствующее влияние на окружающую среду в процессе работы тепловых электростанций.

Для последнего времени также характерно утяжеление смоговых ситуаций в ряде крупных городов. Примером тому могут служить летние смоги в Москве, определенный вклад в которые вносит, очевидно, и сдвиг максимума энергопотребления с зимнего периода на летний. Растет частота возникновения смоговых ситуаций, объем и число загрязнителей

воздуха, что ведет теперь к необходимости уже при очистке приточного воздуха учитывать наличие даже не одного, а групп веществ-загрязнителей. Создание уточненных методик расчетов должно основываться на новых достижениях технических наук с широким привлечением математических методов численного эксперимента и других современных научных методов, включая элементы фундаментальных наук, что позволит создавать более совершенные технологии и аппараты, отвечающие современным требованиям к очистке.

Необходимо также учитывать, что страны ЕС настойчиво продолжают обращать внимание на проблемы изменения климата планеты. Подключается к проблеме и США – известны, например, разработки NASA по программному продукту Google Earth (сервис Google «Volcano»), показывающие картину выброса CO₂ над производственными и жилыми объектами, а также всеми видами транспорта, с почасовым обновлением. Пока интерактивные карты выбросов покрывают территорию США, Канады и Мексики. Забота о программе снижения выброса CO₂ электростанциями США, работающими на угле, проявляется на высшем государственном уровне: в своем меморандуме ([3]) и после него Б. Обама неоднократно отмечал, что ее выполнение с внедрением экологически чистых угольных технологий на углесжигающих энергетических установках, в т.ч. с улавливанием и хранением CO₂, позиционировало бы США как лидера в мировой гонке чистых энергий.

В РФ к 2030 г. также планируется выполнение аналогичных проектов на уровне опытно-промышленных испытаний установок мощностью 50 МВт на одной из ТЭС Поволжского региона (по данным Агентства по прогнозированию балансов в энергетике). В связи с вступлением России в ВТО становятся очевидными актуальность и международное значение исследований, направленных на разработку корректных и рациональных методов конструирования систем очистной обработки выбросов теплоэнергетики, с научно обоснованной оценкой эффективности по галогенам и диоксиду углерода как загрязнителям глобального действия. К настоящему времени официальные методики оценки эффективности работы очистных устройств, в выбросах которых содержатся загрязнители разнонаправленного действия, включая глобальное, отсутствуют. Для организма человека непосредственный контакт с большинством веществ из списков Монреальского и Киотского протоколов, безвреден, ввиду чего они не имеют ПДК. Вместе с тем проблема оценок источников выбросов ОРВ и ПГ в РФ не теряет актуальности по ряду причин, и не в последнюю очередь – из-за возможности использования инструментов, предоставляемых РКИК ООН – т. наз. «механизмов гибкости» (flexibility mechanisms): проектирование очистных систем по договорам механизма чистого развития, МЧР (The Clean Development Mechanism, CDM) и проектам совместного осуществления, ПСО (Joint Implementation, JI).

По МЧР стороны, относящиеся к странам с развитой рыночной и переходной экономикой (страны Приложения I РКИК ООН, для которых установлены лимиты на выбросы ПГ, в т.ч. Россия), могут оказать финансовое и технологическое содействие сторонам с развивающейся экономикой (у которых по РКИК ООН нет ограничений на выбросы), в реализации проектов сокращения (или поглощения) выбросов ПГ. По достигнутым результатам сокращений (или поглощений) оформляются разрешения на выбросы ПГ. Сторона, в которой реализуется проект МЧР, называется Принимающей Стороной (ПС). В качестве ПС, в частности, могут быть все страны СНГ, кроме России, Украины и Беларуси. Разрешением на выбросы от реализации проекта МЧР является Сертифицированное сокращение выбросов (ССВ). Оно может использоваться Стороной Приложения I как подтверждение соблюдения своих лимитов выброса ПГ по РКИК ООН. Таким образом, ССВ как бы увеличивает общий лимит на выбросы ПГ Стороны Приложения I. По ПСО стороны, включенные в Приложение I, могут оказать финансовое и технологическое содействие другим сторонам, также включенным в Приложение I, в реализации проектов сокращения (или поглощения) выбросов ПГ. Сторона, в которой реализуется проект СО, также называется Принимающей Стороной (ПС). На основе достигнутых в результате указанных проектов сокращений (или поглощений), оформляются разрешения на выбросы ПГ в форме единицы сокращения выбросов (ЕСВ). Ее может использовать любая из сторон с целью подтверждения своих количественных обязательств по сокращению выбросов ПГ. Вместе с тем общий лимит на выбросы Сторон Приложения I не изменится, а будет произведена передача разрешений на выбросы между Сторонами.

Поэтому обработка производственных выбросов с парниковыми газами, направленная на сокращение выделения в атмосферу соединений галогенов и диоксида углерода, может стать и экономически прибыльной сферой деятельности предприятий ТЭК.

Основные положения представляемой работы

Цель работы: создание системы комплексных критериальных оценок соответствия очистной обработки пылегазовых выбросов ТЭС актуальным требованиям энергетической эффективности и комплексности очистки с учетом загрязнителей глобального действия, обеспечивающей научные основы для выбора направлений совершенствования газоочистного оборудования и улучшения характеристик выбросов тепловой электрической станции.

Для достижения поставленной цели решался единый комплекс взаимосвязанных *задач*, координированных на обеспечение надлежащего функционирования ТЭС, их энергетических

систем и агрегатов, с привлечением численного эксперимента на базе вычислительной гидродинамики (CFD) и приложением элементов фундаментальных наук:

- разработка научных основ комплексной оценки энергетической эффективности и экологического совершенства систем очистки пылегазовых выбросов, образующихся в едином технологическом цикле производства тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях;
- разработка числовых характеристик для количественной оценки совершенства систем очистки пылегазовых выбросов ТЭС;
- развитие, на базе методов CFD и современных программных продуктов, научных основ комплексной критериальной оценки интенсивности загрязнения окружающего атмосферного воздуха выбросами высоких неизотермических источников – дымовых труб ТЭС, с учетом загрязнителей глобального действия;
- разработка научных основ конструирования и оценки эффективности узлов комплексной обработки выбросов ТЭС, обеспечивающих радикальное обезвреживание загрязнителей глобального действия – соединений галогенов, с опытной верификацией теоретических результатов на образцах ступеней хемосорбционной, конденсационной, циклонно-фильтрационной и термоокислительной обработки выбросов помещений КРУЭ с гексафторидом серы; при этом предусматривается:

-по циклонно-фильтрационной ступени – разработка метода теоретического расчета энергетически эффективных характеристик инерционного осаждения взвешенных частиц на сетчатых пористых слоях; разработка полуэмпирической расчетной модели фильтрации дисперсного потока дымовых газов и/или выбросов помещений КРУЭ ТЭС в системе комплексного обезвреживания; отработка схем численных экспериментов и выполнение расчетов движения частиц в криволинейном потоке с использованием программных комплексов CFD; теоретическое обоснование, на базе математически точного решения задачи о дисперсионных колебаниях гармонических осцилляторов, учета влияния взаимодействия поверхностных элементов частицы золы и элементов пористого слоя;

-по хемосорбционной ступени – теоретическое обоснование расчета режимных характеристик фонтанирования полидисперсного адсорбента на базе математически точного решения задачи о дисперсионных колебаниях гармонических осцилляторов, и опытную проверку режимных характеристик процесса, соответствующую полной деструкции исходного галогенсодержащего вещества – загрязнителя глобального действия, из состава выбросов помещений КРУЭ или/и из продуктов сгорания соответствующих сортов углей ТЭС;

-по узлам конденсации и термообработки – развитие методов определения энергетически эффективных режимных характеристик, обеспечивающих максимальную конденсацию паров галогенсодержащего вещества после ступени хемосорбции для предотвращения попадания в пламенную зону ступени термообработки загрязнителей глобального действия, содержащихся в выбросах помещений КРУЭ или/и в продуктах сгорания соответствующих сортов углей ТЭС;

- реализация результатов исследований.

Предмет и объекты исследования.

Работа содержит теоретические исследования и разработки в плане поиска функционально-технологических, конструктивных и инженерно-технических решений (ст. 11, п.п. 2.2, 7 ФЗ) по энергетически и экологически эффективной очистке выбросов ТЭС с учетом загрязнителей глобального действия. Предмет исследований данной работы непосредственно направлен на исследования по существенным особенностям технических и физико-химических процессов, характерных для систем, установок и агрегатов, связанных единым технологическим циклом производства тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях, и включает конкретно проблемы совершенствования действующих и обоснования новых технологий систем газоочистки ТЭС. Проведены исследования по совершенствованию действующих и обоснованию новых типов и конструкций вспомогательного оборудования тепловых электрических станций (золоулавливающее оборудование, система обработки воздуха помещений КРУЭ), элементов основного оборудования для сжигания газообразного и твердого топлива, выполнены технико-экономические расчеты по снижению ущерба воздушной среде.

Соответствие паспорту специальности: цель работы преследует достижение результатов в области исследований, представленных в паспорте специальности ВАК 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты». Конкретно в работе предусматриваются:

– разработка научных основ методов расчета показателей качества и режимов работы газоочистных агрегатов при сжигании газообразного и твердого топлива в котельных агрегатах тепловых электростанций;

– исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в газоочистных системах и при рассеивании выбросов в окружающей тепловую электростанцию воздушной среде, при работе станции на газообразном и твердом топливе;

– разработка, исследование, совершенствование элементов действующих (газопотребляющих – с непрерывной коррекцией избытка воздуха) технологий и освоение элементов новых (угольных – с ЦКС и парогазовых) технологий производства электрической

энергии и тепла, использования топлива, способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду;

– разработка конструкций теплового (элементов оборудования для сжигания газообразного и твердого топлива по п. 3) и вспомогательного (КРУЭ, золоуловители) оборудования и компьютерных технологий проектирования и диагностирования золоулавливающего оборудования;

– повышение надежности следующих агрегатов тепловых электростанций: теплового – элементов котлоагрегатов с циркулирующим кипящим (фонтанирующим) слоем, и вспомогательного – КРУЭ, золоулавливающее оборудование;

– разработка вопросов эксплуатации и оценки соответствия золоулавливающего оборудования и оборудования КРУЭ тепловых электростанций, связанного с выбросом галогенсодержащих парниковых газов.

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается тем, что они основаны на известных положениях естественных и технических наук, фундаментальных принципах сохранения массы и энергии, а также квантования энергии и действия у объектов микромира. Также их подтверждением служат: сходимость результатов теоретических, численных и опытных исследований; согласованность их результатов с паспортными характеристиками и опытом эксплуатации широко известных систем очистки; верификация полученных в результате теоретических исследований критериальных безразмерных комплексов по опубликованным в центральных изданиях результатам численных и опытных исследований независимых авторов; сопоставление полученных теоретически критериальных характеристик осаждения частиц с аналогичными безразмерными комплексами, опубликованными в *Physical Review Letters* – издании со всемирно признанной достоверностью и обоснованностью публикаций; тестирование моделей численных исследований по опытным данным, в т.ч. по общеизвестному в мировых научных кругах и очевидно достоверному фактологическому материалу по течениям жидкости и газа (М. Ван-Дайк); согласованность с производственным опытом эксплуатации систем очистки, термообработки, осушки в аппаратах с фонтанирующим режимом полидисперсного материала.

Научная новизна работы состоит в создании соответствующих современным требованиям комплексности обработки, с учетом загрязнителей глобального действия, научных основ оценки энергетической и экологической эффективности и расчетов источников и систем очистки выбросов, образующихся в едином технологическом цикле производства тепла и электроэнергии на тепловых электрических станциях, на базе исследований методами CFD с приложением элементов квантовой механики к решению технических задач. Это соответствует

исследованиям по существенным особенностям технических и физико-химических процессов, характерных для систем, установок и агрегатов, связанных единым технологическим циклом производства тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях, в части совершенствования действующих и обоснования новых систем подготовки и сжигания топлива, очистки и транспортировки дымовых газов, и в части выполнения экологических исследований.

Практическое значение решения поставленных задач состоит в совершенствовании и оптимизации систем обработки дымовых газов или/и других производственных выбросов ТЭС с целью совершенствования теплотехнического и очистного оборудования в направлении сбережения энергетических и материальных ресурсов при его изготовлении и эксплуатации, снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду, включая совершенствование действующих и обоснование новых технологий подготовки и сжигания топлива, очистки дымовых газов, вентиляционных выбросов КРУЭ тепловой электростанции, с учетом современного состояния климата и воздушной среды. Это соответствует исследованиям по существенным особенностям технических и физико-химических процессов единого технологического цикла производства тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях в части выполнения экологических исследований.

Отработана схема совместных 2d, 3d численных экспериментов с использованием комплексов CFD для расчетов высоты начального подъема струи над высоким источником выбросов – дымовой трубой ТЭС. Разработанные способы оценки совершенства теплотехнического и очистного оборудования ТЭС позволяют выполнять обоснованный выбор систем с учетом энергетической и экологической эффективности очистной обработки, международных нормативов. Разработанный по результатам исследований метод комплексной оценки выбросов загрязнителей глобального действия рекомендован к практическому применению Государственным докладом «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Республике Татарстан в 2007 г.» [4].

Расчетные зависимости, полученные в результате решения уравнений полуэмпирической модели фильтрации потоков с взвешенными частицами золы и пыли в пористом сетчатом слое, позволяют определять расчетным путем степень очистки выбросов ТЭС при определенных энергетических затратах на стадии проектирования.

Расширенные методики конденсационной и термической обработки, учитывающие наличие в выбросах загрязнителей глобального действия в виде галогенсодержащих веществ, использованы ОАО «Генерирующая компания» в деятельности по проекту совместного осуществления (ПСО) механизма гибкости РКИК ООН для обработки выбросов помещений КРУЭ, содержащих компоненты с высокими значениями потенциалов глобального потепления

(гексафторид серы). Разработанный способ комплексной (сорбционной, термической и конденсационной) обработки обеспечивает высокую степень обезвреживания (выше 98%) при невысоких (менее 1 г/м³) концентрациях галогенсодержащих веществ, что позволяет использовать его при обработке выбросов, загрязненных галогенсодержащими веществами, в том числе – диоксинами и фуранами, образующимися при сжигании определенных сортов углей в котлоагрегатах электростанций.

Испытаны конструкции газогорелочных устройств с устойчивой работой в нестехиометрической области за пределами естественной стабилизации фронта горения; полученное решение может использоваться в парогазовых циклах ТЭС.

Практическое значение разработанной системы комплексной (сорбционной, термической, циклонно-фильтрационной и конденсационной) обработки выбросов, содержащих галогенсодержащие вещества, отмечено в Государственном докладе «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2007 г.» [5]; данная разработка предназначена для обработки выбросов помещений КРУЭ ТЭС и может быть применена к обработке выбросов, загрязненных диоксинами и фуранами, при сжигании «соленых» углей в котлоагрегатах электростанций.

Методология и методы исследования. Методология как принцип построения нового научного знания, создания новой теоретической информации (получения новой теории), в данном исследовании исходит прежде всего из обязательности соблюдения законов сохранения (импульса, энергии и момента импульса – при изучении механических процессов, и материи – в целом). Это иллюстрируется далее, например, при выводе безразмерных комплексных характеристик. Другой методологической основой данной работы является использование таких методов научного познания, принципиальная возможность обеспечения достоверности результатов которыми является общепризнанной. Наконец, завершающим принципом является выполнение разносторонней и максимально объективной верификации полученных в исследовании результатов. Последнее заметнее всего может быть проиллюстрировано по использованию для верификации полученного из теоретических исследований числа Re_c , данных натурных и численных исследований независимых исследователей, опубликованных в известной мировому научному сообществу литературе.

Методы научного познания, примененные в работе, могут быть отнесены по соотношению доли теоретического и эмпирического знания к составному классу с преимущественным преобладанием теоретического знания.

По соотношению категорий общего и частного в работе из методов научного познания применены как общенаучные, так и относящиеся конкретно к области исследований, в рамках

паспорта специальности 05.14.14. Из общенаучных методов широко используются связи анализ-синтез-обобщение; так, в первой главе на основе анализа результатов существующих теоретических и эмпирических исследований, синтеза полученных информационных элементов и их обобщения выявлен круг проблем из области исследований по паспорту специальности, соответствующий современным задачам снижения воздействия ТЭС на окружающую воздушную среду, с учетом выделения парниковых газов и энергетического совершенствования устройств очистной обработки выбросов ТЭС. В разделах, посвященных натурным испытаниям предлагаемых очистных устройств, использован и реальный анализ (методы физического анализа параметров процессов и химического анализа продуктов) с последующей обработкой данных, полученных в опытах, их синтезом и обобщением. В разделах, посвященных теоретическим исследованиям, при получении безразмерных комплексных характеристик используются методы аналогии и теории подобия. Так, одна из таких характеристик – Re_r , получена двумя разными способами аппарата теории подобия – методом анализа размерностей и методом масштабных преобразований. Для реализации последнего метода составлена математическая модель процесса движения частиц золы в криволинейном потоке дымовых газов. С этим использован такой метод научного познания, как математическое моделирование, в его точном виде, в конкретном случае – в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих взаимосвязи параметров процесса сепарации частиц золы из криволинейных потоков. Кроме того, ряд процессов, а именно – прохождения дымовых газов в очистных устройствах через сетчатую пористую среду, рассеивания выбросов дымовых труб ТЭС в окружающей воздушной среде, исследован на базе численного (т.е. приближенного) математического моделирования.

Из методов научного познания, относящихся по соотношению категорий общего и частного к методам конкретных наук, т.е. к области исследований, соответствующей паспорту специальности 05.14.14, в работе применены следующие. Для оптимизации параметров теплотехнических, гидродинамических и физико-химических процессов, характерных для очистных и теплотехнических систем и устройств, связанных единым технологическим циклом производства тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях, включая системы подготовки и сжигания топлива, очистки и транспортировки выбросов и дымовых газов, с целью совершенствования действующих и обоснования новых типов и конструкций основного и вспомогательного оборудования тепловых электрических станций, решались проблемы обеспечения надежности и безопасности оборудования тепловой электростанции, выполнены технико-экономические и экологические исследования. При этом исследования проводились в пределах той области режимных параметров объектов, которая является прямым следствием их

использования как систем и агрегатов тепловых электростанций; для этой же области были получены и характеристики эффективности режимных параметров объектов исследования. Так, например, очистные системы обработки выбросов, содержащих элегаз, разрабатывались только для тех его концентраций и объемов, которые являются прямым следствием использования SF₆ в комплектных распределительных устройствах КРУЭ, а не для условий, соответствующих, например, технологии производства элегаза на соответствующих химических предприятиях. Вместе с тем, естественно, их опыт работы по очистке выбросов изучался.

Также очевидно, что непосредственное определение параметров теплотехнических, гидродинамических и физико-химических процессов, характерных для очистных систем и устройств при производстве тепла и электроэнергии на ТЭС выполнялось общепринятыми проверенными методами соответствующих технических наук: методами теории подобия в теоретических исследованиях теплотехнических и гидродинамических процессов, реальными физико-химическими методами анализа при опытном испытании сорбционных процессов.

Необходимость применения общенаучных методов в конкретных, специфичных научных методах, обусловленных сущностью функционирования очистных систем и устройств, связанных единым технологическим циклом производства тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях, вызывается, по крайней мере, двумя обстоятельствами. Прежде всего, данный объект исследования подчиняется законам физики (в т.ч. термодинамики, квантовой механики, теплопередачи, гидродинамики) и химии, т.к. в нем реализуются физические и химические формы трансформации материи. Поэтому исследования должны выполняться в строгом соответствии с химическими законами и законами указанных разделов физической науки. Во-вторых, методы исследования указанных разделов наук апробированы, т.е. общепризнана достоверность получаемых результатов при выполнении требуемых условий испытаний. Для доказательства же оценки соответствия не апробированных методик измерений степени достоверности, требуемой современными (в т.ч. международными) стандартами, необходимы специфичные исследования вне области паспорта специальности 05.14.14.

Вместе с тем исследования, выполненные по общепризнанным методикам, также нуждаются в верификации, для подтверждения соответствия процедуры выполненных исследований, например, надлежащей практике численных и натурных испытаний [6], надлежащим способам выполнения теоретических исследований. В данной работе верификация, т.е. проверка степени достоверности полученных теоретических положений, производилась путем их сопоставления с широко известными эталонными данными, теоретическими положениями, полученными и официально апробированными другими авторами, а также официально признанными результатами независимых численных и натурных

исследований. Верификация выполнялась как прямым, так и косвенным методами. Так, например, расчеты обтекания препятствий, выполненные методами вычислительной гидродинамики, верифицированы путем прямого наложения линий тока, полученных в результате численных расчетов, на натурные фотографии аналогичного течения из широко известного в научном мире Альбома течений М. Ван-Дайка (см. далее рис. 3.11, раздел 3.1.4). В то же время безразмерный комплекс, полученный теоретически, верифицирован косвенно, посредством логического сопоставления с комплексом, полученным исследователями НАСА, решавшими логически обратную задачу (раздел 2.3.1), а также путем сравнения с принятыми за эталонные широко известными данными заводов-изготовителей по серийным циклонам, выпускаемым в РФ (раздел 3.1.3).

Таким образом, методологическая система построения нового научного знания, принятая в данном исследовании, позволила создать и представить новые теоретические положения, обладающие достаточной степенью достоверности.

На защиту выносятся следующие научные и технические результаты:

- комплексные показатели оценки энергетической, экологической и санитарно-гигиенической эффективности систем очистки;
- новый безразмерный комплекс Re_r , учитывающий энергетические затраты на создание вращательного движения потоков и частиц, и определение на его основе энергетической и экологической эффективности систем инерционной очистки дымовых газов угольной генерации и других гетерогенных выбросов ТЭС в вихревых аппаратах;
- технические приложения к расчетам процессов обработки выбросов ТЭС математически точного решения квантово-механической задачи о нулевых колебаниях:
 - а – к оценкам вклада различных видов взаимодействий в захват частиц золы препятствием в пористом сетчатом слое;
 - б – к учету поверхностного взаимодействия частиц золы и препятствия при зацеплении
 - в – к определению условия потери устойчивости фонтанирующего слоя полидисперсного адсорбента при обработке выбросов помещений КРУЭ ТЭС;
- полуэмпирическая модель образования автослоя при фильтрации частиц золы в пористом слое на тканом сетчатом материале;
- система комплексной (сорбционной, конденсационной, циклонно-фильтрационной и термической) обработки выбросов с соединениями галогенов как загрязнителей глобального действия, из помещений КРУЭ ТЭС, или/и образующихся при сжигании «соленых» углей в котлоагрегатах электростанций;

– схема и результаты численных исследований движения частиц в криволинейном потоке, а также высоты начального подъема струи выбросов высоких неизотермических источников – дымовых труб ТЭС.

Реализация результатов работы.

Разработанная система комплексной (сорбционной, термической, циклонно-фильтрационной и конденсационной) обработки выбросов рекомендована для практического применения в Государственном докладе «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2007 г.»[5]. Результаты исследований горелочных устройств, обеспечивающих корректировку избытка воздуха, внедрены на газоиспользующих установках предприятий неэнергетического профиля и приняты к внедрению ОАО «Генерирующая компания». Разработанный по результатам исследований метод комплексной оценки загрязнения атмосферы выбросами парниковых газов рекомендован к практическому применению Государственным докладом «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Республике Татарстан в 2007 г.»[4]. Составленная на основании данных рекомендаций Временная методика комплексной оценки загрязнения атмосферы выбросами парниковых газов внедрена в проектирование. В частности, в 2008 г. она применена ООО «Газэнергопроект» при проектировании объектов ООО «ТАТМАЗСЕРВИС», и ООО «Стройпроект» в проекте газоснабжения нового жилого комплекса г. Казани «Солнечный город» с производственными объектами. В 2010-11 г.г. методика использована при выборе оптимального варианта теплоснабжения помещений логистического объекта оптово-торговой базы ОАО «Закамье» в г. Н. Челны, РТ. Проекты получили положительные заключения Госэкспертизы и приняты заказчиками. Составлено соответствующее требованиям РКИК ООН доказательство дополнительности проекта совместного осуществления (ПСО), позволяющее ОАО «Генерирующая компания» инициировать ПСО с годовым эффектом 32 млн. руб.

Развитие типовых методик расчетов конденсации паров чистых веществ для случаев конденсации отдельных компонентов из перегретых потоков выбросов отражено в пособии по проектированию (1998г., 31,6 усл. печ. л., из них 29,1 п.л. соискателя), которое получило распространение в России и известность за рубежом; оно является дипломантом Издательской программы-конкурса, проводившейся в 2003-2005г.г. Минобрнауки РФ в честь 300-летия г. Санкт-Петербурга. В текущем году запланирован выпуск 2-ого, переработанного и дополненного, издания данного пособия объемом около 40 п.л. В 2005 г. издано пособие автора по теоретическим основам пылегазоочистки объемом 19 п.л. В 2011-2012 г.г. вышли 2 книжных издания общим объемом 24 п.л. по практикумам пылегазоочистки, в которых соискатель

является соавтором, в 2013 г. – 2 монографии по оценкам эффективности систем очистки выбросов ТЭС общим объемом 30 п.л.

Для обучающихся, специализирующихся по кафедрам теплоэнергетики и теплогазоснабжения КГАСУ (г. Казань), создан и более 20 лет полноценно функционирует, в т.ч. в рамках ФГОС-3 для бакалавров, трехсеместровый учебный курс «Процессы и аппараты газоочистки» (лекции, лабораторно-практический цикл, курсовой проект, ВКР). В последние годы по этому курсу проводится обучение в магистратуре и аспирантуре.

Личный вклад соискателя. Соискателем разработаны: способ комплексной обработки выбросов производственных помещений и конструкции горелочных устройств (идеи изобретений принадлежат всем соавторам соответствующих авторских свидетельств и патентов), полуэмпирическая модель фильтрации, развитие типовых методик расчетов систем конденсации и термообработки выбросов, новый безразмерный комплекс Re_r , для критериальной оценки эффективности систем инерционной очистки дымовых газов угольной генерации и других гетерогенных выбросов ТЭС в криволинейных потоках. Соискателем выполнены: технические приложения точного решения задачи о нулевых колебаниях гармонических осцилляторов, численные исследования движения частиц в криволинейном потоке и высоты начального подъема струи дымовых газов над источником выбросов с использованием комплексов CFD, опытные испытания предложенных горелочных устройств и способов обработки выбросов. Создан и ведется учебный курс «Процессы и аппараты газоочистки».

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на Всесоюзных совещаниях Центрального Правления НТО Энергетики и Электротехнической промышленности (г.г. Санкт-Петербург – Ленинград, Кемерово, Кириши, Казань) в 1977-88г.г.; на семинарах ВЦНИИОТ (г. Казань) в 1978-80г.г.; на научно-методическом семинаре-совещании по теплотехнике вузов республик Средней Азии и Казахстана (г. Бишкек – Фрунзе, Респ. Киргизия – МВ и ССО Кирг. ССР) в 1983г.; на Всесоюзной научно-практической конференции «Человек-труд-экология» (г. Волгоград, ВолгИСИ) в 1990г.; at the 9-th International Convention for European Nuclear Disarmament – END (Helsinki, Finland – Tallinn, Estonia), 1990; на III Всесоюзной конференции «Образование в области окружающей среды» (г. Казань, КГУ) в 1990г.; at the 10-th International Convention for European Nuclear Disarmament – END (Moscow, USSR), 1991; на Республиканском научно-техническом семинаре «Мониторинг окружающей среды» (Казань, КИСИ), 1993г.; на I, II и IV Республиканских научных конференциях «Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан» (г. Казань, АН

Татарстана) в 1993г., в рамках Европейского года охраны природы в 1995г., и в 2000г.; на 3-м международном методическом семинаре Ассоциации строительных вузов «Высшее строительное образование и современное строительство в России и зарубежных странах» (г.г. Москва, Самара, Пекин, Шанхай) в 2008г.; на IV mezinárodní vědecko-praktická konference "Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2008. Vystavba a architektura". (Praha, Česká republika), 2008; на XXI, XXII, XXIII Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21; 22; 23» (ММТТ-21 – г. Саратов, СГУ; ММТТ-22– г. Псков, ППИ; ММТТ-23– г. Саратов, СГУ), в 2008-2010г.г.; на Международных научно-практических конференциях «Инженерные системы – 2009», «Инженерные системы – 2010» (г. Москва, РУДН), в 2009, 2010 г.г.; на Всероссийской научно-практической конференции «Инновации и высокие технологии XXI века» (г. Нижнекамск, Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) КГТУ) в 2009 г.; w VII międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji "Partnerstwo Wschodnie - 2011". Przemysł. 07-15 września 2011 roku; на Международна научна практична конференция „Образование и наука на XXI век - 2011”. София. 17 - 25 октомври 2011 г.; na mezinárodní vědecké - praktická konferenci "Scientific výrobní odvětví na evropském kontinentu". 27. listopadu – 5. prosinec 2011. Česká republika, Praha; на Межвузовских научно-технических конференциях ЛИСИ (г. Санкт-Петербург – Ленинград) в 1973-76г.г., КИСИ (г. Казань) в 1977-80г.г., Новополоцкого политехнического института (г. Новополоцк, Респ. Беларусь – БССР) в 1980г., Казахского политехнического института им. В.И. Ленина (г.г. Алматы – Алма-Ата, Каратау, Жанатас, Респ. Казахстан – Казахская ССР) в 1981-85г.г., КИСИ-КГАСА-КГАСУ (г. Казань) в 1986-2014г.г., на Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения) (г. Иваново, ИГЭУ), в 2013г. и др.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано более 60 печатных работ, в т.ч. пособие по проектированию (второе изд. в печ.), 3 монографии, 4 авторских свидетельства, 2 патента. В изданиях, рекомендованных ВАК, опубликованы 32 статьи (6 статей в журналах, индексируемых базой данных SciVerse Scopus, из них 1 – базой данных Web of Science).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 324 наименований и приложений. Работа изложена на 395 страницах основного текста при общем объеме 445с. и содержит 71 рисунок, 30 таблиц.

1 Сравнительный анализ соответствия современным нормативам теоретической базы оценок способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую атмосферу

1.1 Установление системных взаимосвязей и приоритетов в исследованиях процессов обработки выбросов генерирующих предприятий с позиции обеспечения современных нормативов

1.1.1 Характерные для единого технологического цикла производства тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях параметры газовых выбросов и общая оценка процессов их очистной обработки

Генерирующие предприятия с теплоэнергетическими установками являются крупными источниками гомогенных и гетерогенных выбросов антропогенного происхождения с загрязнителями различных видов и свойств. К примеру, только от угольных электростанций в атмосферу планеты поступает за год порядка $200 \cdot 10^6$ тонн золы с $40 \cdot 10^6$ тоннами диоксида серы, что сопоставимо уже с выбросом не крупного извержения вулкана.

В перспективе российской структуры генерирующих мощностей на ближайшие 10-15 лет заметных изменений не предвидится – доля тепловых электростанций остается на уровне 70%. В топливном балансе ТЭС, как известно, свыше 50% приходится на долю газа, что трактуется в последнее время с отрицательным акцентом. Это справедливо в той части, что объекты теплоэнергетики не относятся к квалифицированным потребителям природного газа; их перевод на газ был выполнен с позиции социальной политики, причем в какой-то степени вопреки технико-экономическим показателям и непосредственной финансовой выгоде государства. Однако в свое время это позволило радикально оздоровить состояние воздушной среды и экологическую обстановку в стране без финансовых издержек на дорогостоящие системы десульфуризации и тонкой очистки дымовых газов от взвесей (класса $PM_{2,5}$ и менее).

Сейчас в качестве примера сбалансированной топливной политики часто приводят статистику США и Германии, где на уголь приходится свыше половины топливного баланса. Однако это положение совсем не однозначно. Прежде всего, ради справедливости же нужно отметить, что данная статистика скорее характеризует меньшую доступность газового топлива, чем стремление использовать его с более высоким потребительским эффектом в других секторах хозяйствования. Так, с приходом российского газа в страны ЕС, его доля в генерировании электроэнергии начала расти. Подобный тренд в США связан с разработками сланцевого газа; это сопровождалось некоторым падением доли угольной генерации, оздоровлением воздушной среды и сбросом подешевевшего угля в Европу, что замедлило там рост газовой генерации. Теперь повышение ее доли стало для ЕС несколько более актуально,

чем для США, с той же позиции снижения затрат на оздоровление состояния воздушной среды: очистные системы угольных электростанций, полностью соответствующие евростандартам и нормативам USEPA, для производителя электроэнергии крайне обременительны.

В странах ЕС электростанции, работающие на угле, оборудуются системами очистки при поддержке ЕБРР в соответствии с директивой 2001/80/ЕС (The LCP Directive). Последний документ является ориентиром и для присоединившихся к ВТО европейских стран. Электростанции США, работающие на угле, оборудуются по программе Clean Coal Technology всеми системами очистки. В ее рамках предполагаются и разработки приемлемых способов улавливания и хранения диоксида углерода.

В России централизованно организуемых программ чистых угольных технологий непосредственно на данный момент нет. Между тем газопотребление ЕС в настоящее время растет, а выхода газодобычи РФ из категории «золотовалютных резервов» на деле не наблюдается. Значит, уже сегодня можно видеть, что газовые месторождения будут вырабатываться максимально интенсивно. К настоящему времени месторождения Западной Сибири выработаны на 60-70%, и могут прослужить еще порядка 2-3 десятков лет. Запасы заполярных месторождений существенно меньше, освоение шельфа проблематично. Поэтому перевод ТЭС с природного газа и мазута на уголь может потребоваться уже не в столь отдаленной перспективе. Для оборудования их газоочисткой, по мнению некоторых специалистов ([7]), понадобятся большие капиталовложения и придется надолго останавливать котлы, что приведет к нарушениям графиков генерации и поставок энергии. Касательно ТЭС это, очевидно, пессимистичный сценарий, поскольку большинство их имеет резервным топливом мазут или уголь, а значит, оснащено на первое время золоулавливающим оборудованием. Иное дело, что у России как члена ВТО нет преференций на получение более дешевой энергии за счет экономии средств на очистке выбросов, и очистные устройства необходимо будет в реальные сроки приводить в соответствие с нормативами ЕС. Поэтому вопросы оценки соответствия энергетической и экологической эффективности систем очистки продуктов сгорания на углесжигающих ТЭС актуальны уже теперь.

Дымовые газы объектов теплоэнергетики, работающих на твердом топливе, содержат наряду с золой ряд гомогенных загрязнителей, из которых характерным для углей является диоксид серы. Используемые в настоящее время системы десульфуризации основаны на обработке продуктов сгорания известью или содой. Они дорогостоящи, и проблема совершенствования схем и технологий обработки выбросов и очистных устройств остается открытой как в России, так и за рубежом, несмотря на обилие иностранных производителей соответствующего оборудования и предложений по данной услуге. Поэтому с позиции

упрощения систем десульфуризации является перспективной разработкой процессов совместной очистки дымовых газов от золы и диоксида серы.

Примем во внимание, что зола от сжигания каменных и бурых углей многих месторождений, например, Канско-Ачинского бассейна, имеет сильнощелочную реакцию водной вытяжки ($\text{pH} = 10 \dots 11,5$) вследствие значительного содержания (до 60%) оксида кальция CaO ([8, 9]). У золы бурых углей некоторых других месторождений, при заметном присутствии CaO (около 10%...20%), реакция слабощелочная или почти нейтральная. Однако, за исключением двух-трех месторождений с кислой реакцией, это обусловлено не кислотообразующими ингредиентами, а высоким содержанием (более 50%) практически нейтрального кремнезема SiO_2 . Следовательно, при интенсивной водной обработке продуктов сгорания углей принципиально возможно организовать одновременное хемосорбционное улавливание SO_2 за счет самой золы или с небольшой добавкой щелочных ингредиентов. Положительному результату процесса будет способствовать также адсорбция части SO_2 поверхностью золы уже непосредственно в топке, что приведет к сокращению в очистном аппарате наиболее длительной стадии процесса химической абсорбции – диффузии SO_2 к CaO , и эффективно подействует на ускорение процесса в целом.

Между тем пропускная способность традиционных систем абсорбции газообразных продуктов не достаточна для обработки дымовых газов ТЭС, объемы которых только от одного парогенератора достигают сотен кубических метров в секунду. Наиболее рационально эта ниша могла бы быть занята аппаратами типа прямоточно-вихревых сепараторов ([10]). Они приспособлены к одновременному улавливанию взвесей и газообразных загрязнителей, обладают высокой пропускной способностью и малыми габаритами. Однако на настоящее время официальных расчетных методик определения эффективности очистки обрабатываемых потоков в таких аппаратах нет, в связи с чем новые разработки в этом направлении на этапах НИОКР и проектирования не имеют возможности сопоставления с традиционными очистными устройствами.

Стороны-участники рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК ООН, UNFCCC) [11], в соответствии со ст. 4 и 12 представляют данные, содержащие оценки по выбросам парниковых газов непосредственного действия – CO_2 , CH_4 , закиси азота N_2O , перфторуглеродов ПФУ (*Perfluorocarbons PFCs*), гидрофторуглеродов ГФУ (*Hydrofluorocarbons HFCs*), гексафторида серы SF_6 , а также по выбросам парниковых газов косвенного действия (провоцирующим образование тропосферного озона) – SO_2 , NO_x , CO и неметановых летучих органических соединений НМЛОС (*NM VOC*). Российский Национальный кадастр в соответствии со статьей 12, п. 1а РКИК ООН, включает информацию по

перечисленным газам в годовые кадастры. Число ключевых категорий источников выбросов в них, определенное в соответствии с методом уровня 1 (все источники с суммарной долей 95% в общем выбросе, и все источники с суммарной долей 95 % в общем тренде, с базового по текущий год), составило 22. Среди них в настоящее время, согласно с [12], одним из двух ключевых категорий источников с наибольшим вкладом как в общий выброс, так и в его тренд, является сектор «Энергетика». Крупные энергетические объекты как генераторы тепловой и электрической энергии, независимо от вида используемого топлива, могут быть источниками выброса пяти из шести гомогенных загрязнителей, подпадающих под действие UNFCCC.

Из списка РКИК ООН, кроме CO_2 , топливоиспользующие устройства объектов энергетики могут направлять в атмосферу с продуктами сгорания еще газы косвенного парникового действия – SO_2 , CO и NO_x . Выброс последних по токсичным свойствам лимитируется законодательством РФ через санитарно-гигиенические нормативы. При этом дополнительного учета SO_2 , CO и NO_x как загрязнителей глобального действия, для топливоиспользующих энергетических установок не требуется: если выброс не превышает ПДВ, то объемов выбрасываемых загрязнителей недостаточно для образования заметного количества тропосферного озона. Также в ряде современных работ представлены результаты по существенному снижению концентрации NO_x и CO в дымовых газах ТЭС (напр., в [13, 14]). Следовательно, для определения энергетической и экологической эффективности таких мероприятий с позиции снижения глобального воздействия на климат необходимы показатели, объективно учитывающие уменьшение потери качества воздушной среды вокруг соответствующих объектов.

Энергетические объекты, работающие на природном газе, всегда являются источниками попадания в атмосферу другого парникового газа из списка РКИК ООН – метана. В Национальном кадастре т. наз. «фугитивный» метан (выделяющийся через неплотности коммуникаций, а также при плановых и нештатных выбросах) рассматривается как один из ключевых источников выброса парниковых газов для России. Более того, за последнее время его рейтинг среди 22 ключевых источников парниковых газов переместился с четвертого на третий (первый и второй – выброс CO_2 при сжигании газового и твердого топлива). При этом кадастр учитывает «фугитивный» CH_4 по укрупненным показателям (коэффициентам эмиссии), установленным в целом для России. Использовать их для отдельных предприятий энергетики некорректно. На самих предприятиях объемы выброса CH_4 в нештатных ситуациях прогнозировать сложно, а выделения через неплотности, не превышающие испытательных нормативов систем газоснабжения, в отчетностях не фигурируют. Для установления целесообразности учета «фугитивного» CH_4 как парникового газа в составе выбросов объектов

теплоэнергетики определим его ориентировочные объемы на газоиспользующих ТЭС, воспользовавшись данными по аналогичным потерям на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов.

Суммарные потери газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и в коммуникациях КС оцениваются ориентировочно от 3% до 8% суточной производительности. Из них основная доля потерь приходится на операции пуска-останова ГПА (около 75%) и на оборудование компрессоров (около 12%); потери в коммуникациях составляют около 5% ([15]): 2,9% - предохранительные клапаны, и 2,33% – «фугитивные» выделения через неплотности M_F (из уплотнений запорной арматуры по штоку, из фланцевых и резьбовых соединений). Следовательно, в коммуникациях КС «фугитивные» потери можно оценить в пределах от 0,07% до 0,186%, выхлопы предохранительных клапанов – в пределах от 0,087% до 0,232% производительности системы по газу. На ТЭС предохранительные клапаны срабатывают или в нештатных ситуациях, или при плановых поверках и мероприятиях, сопровождающихся существенной нестационарностью гидравлических режимов в газопроводах – плановых остановках, пусках, повышении или сбросе нагрузки котлов, и т.д. Поэтому данный вид выделений метана на ТЭС менее интенсивен, чем на КС. Примем его для ТЭС оценочно не превышающим 10% выброса клапанов КС – от 0,009% до 0,023%.

Скорректируем и «фугитивные» выделения через неплотности. Здесь учтем, что давление в коммуникациях $P_{КС}$ близко к магистральному (порядка 7 МПа), тогда как в газопроводах обычных ТЭС (без ПГУ) давление $P_{ТЭС} \leq 1,2$ МПа (изб.), и объем утечек через неплотности должен быть меньше. Соотношение фугитивных компонентов потерь в газопроводах ТЭС $M_{FTЭС}$ и КС $M_{FKС}$ определим согласно с известной формулой адиабатического истечения, приняв показатель адиабаты для метана $k = 1,29$, и атмосферное давление $P_0 = 0,101$ МПа:

$$\frac{M_{FTЭС}}{M_{FKС}} = \sqrt{\frac{(P_{ТЭС}/P_0)^{\frac{2}{k}} - (P_{ТЭС}/P_0)^{\frac{k+1}{k}}}{(P_{КС}/P_0)^{\frac{2}{k}} - (P_{КС}/P_0)^{\frac{k+1}{k}}}} = \sqrt{\frac{(1,301/0,101)^{\frac{2}{1,29}} - (1,301/0,101)^{\frac{2,29}{1,29}}}{(7,101/0,101)^{\frac{2}{1,29}} - (7,101/0,101)^{\frac{2,29}{1,29}}}} = 0,187 \quad (1.1)$$

Тогда «фугитивные» утечки $M_{FTЭС}$ в газопроводах ТЭС составят 0,013...0,035%. Вместе с выбросами предохранительных клапанов потери метана составят от 0,022% до 0,057%, или от 22 до 57 м³/ч на каждые 10⁵ м³/ч газа, расходуемого на ТЭС. Укрупненные показатели имеют меньший порядок, и полученный здесь результат можно рассматривать как предельную величину. Вместе с тем и в том, и в другом случае найденные объемы выбросов являются

значимыми величинами. Поэтому показатели оценки эффективности работы ТЭС должны обеспечивать возможность учета в качестве парникового газа не только CO_2 , а несколько видов парниковых газов.

Из включенных в список РКИК ООН парниковых газов непосредственного действия крупные теплоэнергетические объекты могут стать еще источниками ПФУ, образование которых вероятно при искровых и дуговых разрядах на клеммах, и гексафторида серы, или электротехнического газа (элегаз, sulfur hexafluoride), SF_6 . С середины прошлого века в атмосфере стабильно обнаруживается также их гибрид SF_5CF_3 (серы трифторметилпентафторид, trifluoromethyl sulfur pentafluoride), обладающий очень высоким потенциалом воздействия на климат [16, 17]. Его появление в атмосфере связывают с высоковольтным оборудованием: продукт распада элегаза SF_6 взаимодействует с CF_3 , который появляется в том же оборудовании как продукт распада фторполимеров. Предположение основано на том, что подобные реакции между SF_6 и фторполимерами возникают даже в чипах электронных устройств. Кроме того, скорости роста концентраций SF_5CF_3 и SF_6 в атмосфере очень близки, что указывает на связанность поступления этих веществ [18]. Авторами работы [19] исследована возможность образования SF_5CF_3 также непосредственно в реакциях SF_6 , происходящих при разрядах в высоковольтном оборудовании и электрических устройствах. Концентрации SF_5CF_3 пока невелики, но из-за высокой стабильности (время жизни более 1000 лет – [20]) будут расти, внося необратимые изменения в состав атмосферы и в радиационный форсинг климата планеты. Однако количественно оценить как ПФУ, так и SF_5CF_3 , затруднительно, и по выбросам предприятий энергетики в качестве парниковых газов дополнительно к CO_2 и CH_4 упоминают только гексафторид серы SF_6 . Количественные оценки элегаза как загрязнителя глобального действия также неоднозначны. Далее за основу приняты данные [21] отчета МГЭИК (Межправительственной группы экспертов по изменению климата, IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) за 2007 г. Они позволяют оценить, насколько целесообразно добавление SF_6 к CO_2 и CH_4 при исследовании вопроса о выбросе энергетическими предприятиями загрязнителей глобального действия.

Согласно с данными МГЭИК, в 2005 г. концентрация элегаза в атмосфере C_{SF_6} составила $5,6 \pm 0,038$ ppt. Она возросла с 1998 г. на 1,5 ppt, или на 36 %. МГЭИК оценивает производимое SF_6 радиационное воздействие (radiative forcing, ΔF_R) в 2005 г. около $0,0029$ Вт/м². Величина ΔF_R представляет, по сути, отклик атмосферы на загрязнение, в данном случае, гексафторидом серы, как изменение баланса коротковолнового (принимаемого, F_{in}) и длинноволнового (испускаемого, F_{out}) потоков теплового излучения на высотах тропопаузы. Концентрация CO_2 в атмосфере планеты C_{CO_2} по данным 2005 г. была равна $379 \pm 0,65$ ppm, т.е. в $677 \cdot 10^5$ раз выше,

чем C_{SF_6} , а величина радиационного воздействия (форсинга) ΔF_{RCO_2} составила 1,66 Вт/м², т.е. превосходила ΔF_{RSF_6} в 550 раз. Согласно с этим, молекула SF₆ по радиационному форсингу превосходит молекулу CO₂ в 118 тыс. раз, а справочная величина потенциала глобального потепления ПГП (Global warming potential, GWP) SF₆ составляет около 24 тыс.

На настоящее время, несмотря на отсутствие точных данных по количеству выбросов и концентрации SF₆ в атмосфере, хорошо известна его характеристика как вещества, наиболее интенсивно поглощающего инфракрасное излучение. ПГП элегаза на 30% выше, чем у упомянутого ранее производного соединения SF₅CF₃ ([22]). В ЕС на законодательном уровне запрещено любое использование элегаза, кроме КРУЭ, утечки от которых жестко контролируются. Несмотря на это, ежегодный прирост SF₆ в атмосфере планеты сейчас оценивают от 5 до 8%, тогда как прирост CO₂ не превышает 2%. По показателю изменчивости гексафторид серы также значительно превосходит остальные загрязнители из списков РКИК ООН и Монреальского протокола, что вызывает повышенное внимание к нему надзорных органов европейских стран – членов ВТО. С этой позиции учет элегаза как компонента выброса энергетических источников, оказывающего глобальное воздействие на климат планеты, вполне уместен.

Методика оценки эффективности работы устройств и систем, являющихся источниками выбросов с несколькими видами парниковых газов, должна учитывать их различия в глобальном воздействии на климат планеты. Поэтому представленные ранее расчетные зависимости необходимо дополнить характерными параметрами парниковых газов. Количественное сравнение газов – загрязнителей глобального действия по влиянию на изменение климата принято сейчас характеризовать их временем жизни (the lifetime, t_l) в атмосфере, форсингом и связывающим эти параметры потенциалом глобального потепления.

Время жизни газа в атмосфере обычно определяется как период, за который в атмосферу поступает такое же его количество, сколько уже содержится, или период, за который число его молекул, оставшихся в атмосфере, уменьшится в какое-то обусловленное число (напр., в 2,718) раз. Так, время жизни метана $t_l_{CH_4}$ оценивается от 8 до 14 лет, а углекислого газа $t_l_{CO_2}$ – от 3-5 до 30-200 лет. Многие авторы принимают в расчетах для углекислого газа $t_l_{CO_2} = 100$ лет. По разным оценкам, у гексафторида серы $t_l_{SF_6}$ составляет от 1000 до 3200 лет. Можно видеть, что $t_l_{SF_6}$ определено по уменьшению числа молекул – по данным об изменчивости SF₆, через 20 лет концентрация SF₆ удвоится, если его выброс радикально не сократится. Поэтому с позиции времени жизни элегаза его учет в выбросах энергетических источников также следует признать целесообразным.

ПГП молекулы i -того парникового газа, как численный параметр его разогревающего действия, устанавливается по условной математической модели воздействия на атмосферу залпового выброса загрязнителя в количестве, существенно превосходящем реальное годовое поступление. После расчета (за период 100 лет или за время жизни i -того загрязнителя t_{li} , если оно меньше) эволюции радиационного форсинга в результате внесения данного возмущения, определяется численное значение интеграла функции форсинга i -того вещества по времени

$\Delta Q_{Ri} = \int_0^{t_{li}} \Delta F_{Ri}(t) dt$, Дж/м². Его отношение к подобному интегралу для CO₂ дает значение ПГП

с горизонтом времени 100 лет GWP_{100} :

$$GWP_{i100} = \frac{\Delta Q_{Ri}}{\Delta Q_{RCO_2}} = \frac{\int_0^{t_{li}} \Delta F_{Ri}(t) dt}{\int_0^{100} \Delta F_{RCO_2}(t) dt}. \quad (1.2)$$

Несмотря на абстрактность модели, значения GWP_{100} достаточно однозначно характеризуют загрязнители в сравнении с CO₂. Оценим целесообразность учета SF₆, приняв $GWP_{SF_6} = 24000$, и концентрацию SF₆ в атмосфере (при ежегодном приросте 5%) в текущем году не менее 7,5 ppt. С учетом GWP_{SF_6} это эквивалентно $C_{CO_2} = 0,18$ ppt, что равносильно недельному приросту CO₂ в атмосфере планеты. Поскольку речь идет не о колебаниях, а о постоянном росте содержания CO₂ в атмосфере, то найденная величина представляется значимой.

Оценку значимости можно подтвердить также, обратившись к характеристикам текущего состояния атмосферы. Допустим, что в течении принятого горизонта времени (в 20, 100 или 500 лет) их присутствие в атмосфере будет непрерывным. Тогда актуальным, «сегодняшним», показателем i -того компонента глобального действия будет предел изменения его форсинга за стремящийся к нулю отрезок в пределах принятого горизонта времени. Математически это представится производной по времени интеграла ΔQ_R в выражении (1.2):

$$\frac{\partial(\Delta Q_{Ri})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_0^{t_{li}} \Delta F_{Ri}(t) dt \right) = \Delta F_{Ri}(t)_{\Delta t \rightarrow 0}. \quad (1.3)$$

Согласно с (1.2 и 1.3), сопоставление актуальных значений радиационных форсингов SF₆ и CO₂ будет давать для SF₆ величину ПГП и оценку его влияния как парникового газа на состояние атмосферы при нулевом горизонте времени (фактически – в текущем году):

$$\left. \frac{\Delta GWP_{SF_6 100}}{\Delta t} \right|_{\Delta t \rightarrow 0} = \frac{\Delta F_{RSF_6}(t)_{\Delta t \rightarrow 0}}{\Delta F_{RCO_2}(t)_{\Delta t \rightarrow 0}}. \quad (1.4)$$

Как отмечалось, по удельным характеристикам $\Delta F_{R SF_6} = 1,18 \cdot 10^5 \Delta F_{R CO_2}$. Следовательно, по форсингу C_{SF_6} эквивалентна $C_{CO_2} = 0,9$ ppm, что сопоставимо с погрешностью определения концентрации CO_2 – технической характеристикой, по своей сути являющейся значимой величиной. Таким образом, в целом по всем параметрам, характеризующим загрязнители как парниковые газы – показателю изменчивости, времени жизни, форсингу и ПГП, учет гексафторида серы в дополнение к CO_2 и метану в выбросах энергетических источников представляется целесообразным.

Кроме фторидов, в определенных случаях ТЭС становится источником выброса и других галогенов. Так, например при сжигании в топках парогенераторов ТЭС пылевидных углей, содержащих соединения хлора, последние частично преобразуются в диоксины и фураны (по номенклатуре загрязняющих веществ, используемых институтами ООН – стойкие органические загрязнители, СОЗ, persistent organic pollutants, POP) и с дымовыми газами попадают в атмосферу.

Проблема образования соединений хлора при сжигании в топках пылевидных «соленых» углей достаточно хорошо известна и за рубежом, и в России. Месторождения с хлорсодержащими углями эксплуатируются в Великобритании, Германии, Австралии, США, Канаде. В бывш. СССР «соленые» угли получали с месторождений Украины (Новомосковское и Петриковское месторождения, Западный Донбасс; Старобельский и Миллеровский угленосные районы, Северный Донбасс, с длиннопламенными и бурыми углями) и Казахстана (бурые угли Тургайского бассейна, месторождение Приозерное в Кустанайской области, и Нижне-илийское месторождение, Алматинская область). В последние десятилетия идет совместная российско-казахстанская разработка месторождений Тургайского бассейна для угольной энергогенерации.

В XX столетии исследования по сжиганию углей, содержащих соединения хлора, были направлены преимущественно на изучение образования в пылеугольном факеле хлористого водорода как основного коррозионного агента, приводящего к выходу из строя поверхности нагрева котлоагрегатов ТЭС. Это безусловно серьезная проблема, непосредственно связанная с нормальным функционированием ТЭС: скорость высокотемпературной коррозии поверхностей нагрева в зависимости от содержания хлора в угле и способа сжигания может достигать до нескольких миллиметров в год. Вместе с тем полученные в подобных работах

экспериментальные и расчетные данные отчетливо указывают на образование в пламени и продуктах сгорания также других соединений хлора. Так, например, в работе [23] выполнены термодинамические расчеты равновесного состояния компонентов топочных газов и экспериментальные исследования образования хлористого водорода в пылеугольном факеле при сжигании приозерного, новомосковского и ниже-илийского углей с высоким содержанием хлора, проведено исследование коррозии поверхностей нагрева котла БКЗ-500-140-1 Красноярской ТЭЦ-2 при сжигании приозерного угля Тургайского бассейна с содержанием хлора $Cl^d = 0,2 \%$. При этом автор работы [23] считает объективной оценкой содержания хлора в энергетических углях не по массе, а по теплоте сгорания; по этому показателю содержание хлора в приозерном угле составляет 0,13 кг/ГДж и сравнивается с показателями наиболее концентрированных углей Великобритании и Украины.

По данным цитируемого исследования, на котле блока 500 МВт, сжигающем этот уголь, скорость коррозии выходной ступени вторичного пароперегревателя (аустенит) составляла 0,4 мм/год. Этот же автор указывает, что хлор присутствует в угле в двух основных формах: в виде хлоридов щелочных металлов (в основном NaCl) или ионов хлора, соединенных с органической массой угля ионообменной связью. По проведенным им лабораторным испытаниям, при нагреве до температуры 258°C навески хлорсодержащего угля 90-100% высвобождающегося хлора присутствует в форме хлористого водорода. При этом установленная цитируемым автором главная особенность процесса заключается в том, что выход хлора опережает выход летучих, и хлор представляет один из наиболее легко связанных с угольной массой компонентов. В соответствии с результатами его термодинамических расчетов, 97% от содержащегося в угле хлора в процессе горения трансформируется в хлористый водород. Автор отмечает, что пары хлоридов щелочных металлов и хлор, высвободившиеся при разложении органических соединений угля в топочной камере котла, химически взаимодействуют с водяными парами, оксидами серы, кислородом и другими компонентами газовой среды, а при сжигании приозерного угля равнозначно важное значение в процессе образования HCl имеет как температура факела, так и величина коэффициента избытка воздуха.

Итак, приведенные данные показывают, что определенное количество (ориентировочно от 3 до 10%) содержащегося в угле хлора, а также пары HCl, оказываются в зоне горения раньше летучих горючих. Поэтому они имеют возможность вступать в высокотемпературной зоне топки котла в реакции с летучими горючими одновременно с кислородом. С учетом того, что данные реакции осуществляются по радикально-цепному механизму, а скорости реакций окисления радикалов летучих горючих кислородом и хлором одинаковы, становится

очевидным, что Cl и HCl будут активно участвовать в элементарных стадиях цепных реакций окисления углеводородов и других компонентов летучих горючих. Таким образом, летучие будут равноценно окисляться и кислородом, и хлором. При этом наряду с обычными конечными продуктами радикально-цепных реакций окисления органических веществ при совместном присутствии кислорода и хлора – H₂O, CO₂, CO, HCl, Cl₂, HClO_x, COCl₂, в продукты сгорания могут попадать и более сложные хлорорганические соединения, генерируемые в пламени на промежуточных стадиях цепных реакций.

Наличие в качестве таковых хлорорганических СОЗ в виде соответствующих диоксинов и фуранов при угольной энергогенерации достоверно обосновано современными исследованиями и вошло в методические руководства, используемые на международном уровне. Так, в соответствии со Стокгольмской конвенцией ООН о СОЗ, выбросы непреднамеренно производимых СОЗ, таких как полихлорированные дибензо-*p*-диоксины и полихлорированные дибензофураны (ПХДД/ПХДФ), должны сводиться к минимуму до полного устранения. В связи с необходимостью выявления и количественной оценки своих источников выброса ПХДД/ПХДФ Сторонами-участниками конвенции, Программой ООН по окружающей среде подготовлено методическое руководство по проведению этой работы. [24]. В разделе «Процессы сжигания» данного руководства выделена категория производства электроэнергии и тепловой энергии в границах процессов сжигания ископаемого топлива и других горючих материалов. Рассматриваемая категория производства электроэнергии и тепловой энергии включает электростанции. Указывается, что выбросов диоксинов/фуранов, связанных с иными способами энергогенерации, как то: топливные батареи, солнечная и ветровая энергия, гидроэлектростанции, геотермальные и атомные станции, не выявлено. В руководстве дается следующая общая характеристика выброса диоксинов/фуранов при угольной генерации. На крупных, хорошо контролируемых электростанциях, работающих на ископаемом топливе, образование ПХДД/ПХДФ незначительно, поскольку полнота сгорания, как правило, достаточно высока, и на них, обычно, используют топливо, которое однородно и содержит больше серы, чем хлора, что сдерживает образование ПХДД/ПХДФ. Однако большие по массе эмиссии все же возможны, так как объемы дымовых газов, содержащих небольшие концентрации ПХДД/ПХДФ, очень велики.

В указанной методике количество выброса ПХДД/ПХДФ рекомендуется относить к теплоте сгорания, а не та тонну использованного топлива. Основанием для данной рекомендации является то, что диапазон значений теплоты сгорания углей, используемых в различных частях света для производства электроэнергии, растянут более чем на порядок. Поэтому в методике установочные факторы эмиссии представлены не в мкг М-ТЭ/т топлива, а

в мкг М-ТЭ/ТДж теплоты сгорания топлива (М-ТЭ - международный токсический эквивалент, International Toxicity Equivalent, определяемый по 2,3,7,8-тетрахлордibenзо-п-диоксину, 2,3,7,8-ТХДД, $C_{12}O_2Cl_4$, ПДК которого составляет 0,5 $\mu\text{г}/\text{м}^3$).

По данным исследований, проведенных в Бельгии, Германии и Швейцарии, в методике ООН представлены следующие уровни эмиссии ПХДД/ПХДФ в воздух при сжигании углей на электростанциях. Фактор эмиссии по крупным электростанциям Голландии, работающим на угле, составил 0,35 мкг ТЭ/т, данные из Германии колебались от 0,09 до 7,1 мкг ТЭ/ТДж, диапазон данных из Великобритании составил 0,06...0,32 мкг ТЭ/т. Швейцарские источники приводят средние факторы эмиссии для угольных электростанций 230 мкг ТЭ/ТДж. По данным из Германии для котлов, работающих на природном газе, значение эмиссии составляет от 0,02 до 0,03 мкг ТЭ/ТДж.

Как следует из приведенных ООН данных по угольным электростанциям, при угольной энергогенерации происходит существенное образование диоксинов и фуранов в топках котлов. ПДК указанных веществ по российскому законодательству составляет $5 \cdot 10^{-7}$ $\mu\text{г}/\text{м}^3$, а энергоблок мощностью 800 МВт потребляет количество топлива, эквивалентное по теплоте сгорания 1 ТДж, за 20 минут. Проблема дополнительно актуализируется в связи с функционированием российских генерирующих компаний в рамках ВТО. В настоящее время на Украине интенсивно предпринимаются исследовательские работы и другие меры, направленные на паспортизацию выбросов ПХДД/ПХДФ электростанций и теплогенерирующих предприятий, потребляющих угли, на базе отмеченного выше методического руководства ООН [25]. Российским законодательством сфера защиты атмосферы от выбросов тепловыми электростанциями загрязнителей глобального характера принята в качестве одного из семи приоритетных направлений развития науки в целом и второй по значимости (после эффективной разведки и добычи ископаемых топлив) среди перспективных направлений научных исследований в энергетике [26]. Ожидаемые к 2030 г. результаты в сфере эффективной и экологически чистой теплоэнергетики: новое поколение теплоэнергетических установок на органических топливах, созданных с учетом требований охраны окружающей среды и предотвращения изменения климата, со значениями КПД, близкими к предельным, и высокими эксплуатационными характеристиками.

1.1.2 Сравнительная оценка количества и состава вентиляционных выбросов по котельному и турбинному залам, бункерному и зольному помещениям главного здания ТЭС, помещениям РУ, КРУЭ, в соответствии с современной нормативной базой по ТЭС

Задача разработки комплексных показателей, которые обеспечивали бы объективную санитарно-гигиеническую, экологическую и энергетическую эффективность генерирующего предприятия, осложняется, очевидно, и тем, что загрязнители поступают в атмосферу с выбросами, имеющими различные характеристики, и из источников выброса разных типов. Из множества видов выбросов генерирующего предприятия можно выделить два характерных вида – дымовые газы и вентиляционные выбросы. По количеству дымовые газы превосходят вентиляционные выбросы. Температура дымовых газов существенно выше окружающего атмосферного воздуха, а температура вентиляционных выбросов значительно ближе к нему. Различаются они также по загрязняющим веществам, источникам образования и выброса. Дымовые газы с содержащейся в них золой, SO_2 и/или CO_2 , NO_x , образуются в топках парогенераторов и выбрасываются из дымовых труб, которые могут быть классифицированы как точечные высокие источники горячих выбросов. Угольная пыль или фугитивный метан, гексафторид серы и, возможно, его производные, поступают в окружающий воздух из зданий и сооружений ТЭС с вентиляционными холодными (близкими к изотермическим) выбросами через низкие линейные или площадные (объемные) источники. Очевидно, что источники выброса первого типа относят дымовые газы достаточно далеко от самого энергетического объекта, тогда как вторые производят выброс на его территории или в санитарно-защитной зоне (СЗЗ). В связи с этим к выбросу последних, несмотря на меньшее количество, предъявляются более жесткие ограничения.

Вместе с тем зачастую выброс дымовых газов ТЭС считают превалирующим, и на этом основании из области исследования способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду по паспорту специальности 05.14.14 часто исключают проблемы, связанные с поступлением загрязнителей вентиляционных выбросов зданий и сооружений ТЭС. Определим ориентировочное количество вентиляционных выбросов ТЭС для оценки того, насколько правомерен такой подход.

Набор основных зданий и сооружений, располагающихся на территориях ТЭС, следующий: главный корпус с котельным и машинным залом, топливное хозяйство, дымовая труба, ЛЭП, система водоснабжения, подсобные помещения, железнодорожные и автомобильные подъездные пути. ТЭС, использующие уголь в качестве основного или резервного топлива, имеют также бункер угольной пыли; в этом случае имеют свои отличия топливное хозяйство, подъездные пути и др. объекты. Из перечисленных выше зданий и

сооружений типичным объектом по вентиляционным выбросам является главное здание ТЭС. Оценим их объемы в соответствии с современными нормативами для тепловых электростанций по своду правил СП 90.13330.2012 – Актуализированная редакция СНиП II-58-75 «Электростанции тепловые» [27] (далее – СП 90), устанавливающему нормы и правила проектирования ТЭС мощностью более 1 МВт.

В соответствии с разделом 10.1 «Отопление, вентиляция, кондиционирование и обеспыливание воздуха» (п. 10.1.1 СП 90), системы вентиляции в зданиях и сооружениях ТЭС, а также системы обеспыливания воздуха тракта топливоподдачи, следует проектировать с учетом требований СП 60.13330.2012 – Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование» [28] (далее – СП 60), СП 50.13330 – Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий», и норм данного документа. Рекомендуемые температуры и кратность воздухообмена в помещениях ТЭС приведены в его приложении Д. Предписывается устанавливать кратность воздухообмена в час по главному корпусу на основании расчетов по избыткам явной теплоты. Однако такой метод невозможно использовать для рассматриваемого случая, поскольку оценки не привязываются к конкретному генерирующему предприятию. Для определения приблизительных объемов вентиляционных выбросов воспользуемся указаниями п.п. 10.1.16, 10.1.18 СП 90[27].

В соответствии с п. 10.1.18, расход приточного воздуха в котельном отделении с котлами, работающими на газообразном топливе, а также в машинном отделении с газотурбинными установками следует принимать в соответствии с расчетом, но не менее трехкратного воздухообмена в час в пределах ячейки каждого энергоблока. При этом для определения воздухообменов по указанным кратностям в расчетных внутренних объемах помещений или зонах следует принимать фактическую высоту помещений или зон при высоте от 4 до 6 м, а при большей и меньшей высоте помещения или зоны - соответственно 6 м и 4 м. При наличии же площадок их площадь следует учитывать как площадь пола с указанными выше высотами. В соответствии с п. 10.1.16, в холодный период года в машинное отделение подача приточного воздуха системами вентиляции с механическим побуждением должна предусматриваться в количестве 1,5–2-кратного воздухообмена помещения в час. Исходя из этого, можно полагать, что кратность воздухообмена в котельном зале ТЭС на твердом топливе может быть в пределах 1,5–3.

Для ТЭС с различной мощностью энергоблоков разработано множество типовых проектов главного корпуса. Соответствующие проекты Теплоэлектропроекта имеют следующие удельные строительные показатели – строительный объем на установленный киловатт (далее – удельный строительный объем, УСО): для энергоблоков мощностью до

500 МВт – около $1,5 \text{ м}^3/\text{кВт}$, свыше 500 МВт – около $0,6 \text{ м}^3/\text{кВт}$. Для оценочных расчетов площади котельного и машинного залов (с бункерным отделением) можно принять одинаковыми, а высоту котельного зала в 2 раза выше высоты турбинного зала. Тогда котельный зал будет иметь $УСО_{кз} = (0,4 - 1) \text{ м}^3/\text{кВт}$, турбинный зал вкуче с бункерным отделением – $УСО_{тб0} = (0,2 - 0,5) \text{ м}^3/\text{кВт}$. Соотношение площадей турбинного и бункерного отделений примем как 4:1, тогда на турбинный зал придется $УСО_{тз} = (0,16 - 0,4) \text{ м}^3/\text{кВт}$, на бункерное отделение – $УСО_{б0} = (0,04 - 0,1) \text{ м}^3/\text{кВт}$.

Удельный строительный объем главного здания ТЭС зависит и от типа компоновки. В принципе, котельная и машинный зал могут находиться в одном и том же (сомкнутая компоновка) или в различных зданиях (разомкнутая компоновка). На современных ТЭС применяется закрытая компоновка с параллельным размещением котельного, бункерного и машинного отделений. По п. 9.1.13 [27], при проектировании ТЭС следует рассматривать возможность размещения в одном здании помещений различных производств, если их объединение не противоречит требованиям норм безопасности (взрывопожарной, пожарной и др.) и санитарно-гигиенических норм.

Котельное отделение делится на ячейки по парогенераторам. Современные котлы выполняются с нижним выпуском дымовых газов, и их устанавливают в котельном зале фронтом к турбинному залу. При блочной компоновке ширина ячейки по фронту равна шагу блока, определяемому габаритами парогенераторов (от 20 до 48 м). Дымососы, вентиляторы и золоуловители размещают за котлами – вне здания или в пристроенном помещении, в зависимости от вида топлива и климатических условий.

Котельный зал делится по высоте основной отметки обслуживания (около +10,000 м) на котельное и зольное помещения. Следовательно, в соответствии с п. 10.1.18 при расчетах по кратности воздухообмена количество вентиляционных выбросов котельного зала необходимо подсчитывать на удвоенную площадь, приняв при этом внутренний объем по высоте 6 м над каждой площадкой. Поскольку $УСО$ котельного зала определен на фактическую высоту (порядка 60 м), то его удельный внутренний объем $УВО_{кз}$ для расчета объемов вентиляционных выбросов составит:

$$УВО_{кз} = 2УСО_{кз} \cdot 6/60 = (0,08 - 0,2) \text{ м}^3/\text{кВт}$$

С внутренней или внешней стороны котельного зала располагают бункерные помещения. Размещение бункерного помещения с внутренней стороны (перед фронтом котлов) увеличивает расстояние между котлами и турбинами. Соответственно, на его ширину удлиняются паропроводы, но становится более компактной система пылепитания. В нижней части на нулевой отметке устанавливаются вращающиеся механизмы, а на основной отметке

под бункерами установлены питатели угля и пыли. Над бункерами вдоль котельного отделения размещается галерея раздающих транспортёров, а на крыше бункерной этажерки - пылевые сепараторы и циклоны. По высоте бункерное отделение примем таким же, как и турбинное отделение, но разделенным как котельное основной отметкой обслуживания на две части. Поэтому его удельный внутренний объем $УВО_{б0}$ составит:

$$УВО_{б0} = 2УСО_{б0} \cdot 6/30 = (0,016 - 0,04) \text{ м}^3/\text{кВт}.$$

Строительный объем турбинного зала зависит от расположения турбин: при поперечном расположении его пролет на 30-50% больше, чем при продольном. При поперечном размещении для агрегатов мощностью 200 МВт требуется пролет не менее 42 м, 300 МВт — 48 м, 500 МВт — 51м. Для блоков мощностью 800 МВт с целью уменьшения пролета принимают продольное размещение агрегатов, с пролетом турбинного зала 36 м. Часть оборудования турбинного зала располагается в деаэрационном помещении в несколько этажей. Для ориентировочных расчетов можно принять, что турбинный зал по высоте делится не менее чем на 3 этажа, и в этом случае его удельный внутренний объем $УВО_{т3}$ составит:

$$УВО_{т3} = 3УСО_{т3} \cdot 6/30 = (0,096 - 0,24) \text{ м}^3/\text{кВт}.$$

Итого, суммарный удельный внутренний объем главного корпуса ТЭС для расчета объемов вентиляционных выбросов $УВО_{гк}$ составит:

$$УВО_{гк} = УВО_{к3} + УВО_{т3} + УВО_{б0} = (0,192 - 0,48) \text{ м}^3/\text{кВт}$$

Исходя из 1,5-кратного воздухообмена помещения в час, в соответствии с п. 10.1.16, получим минимальную оценочную величину вентиляционного выброса главного здания ТЭС на твердом топливе в пределах $(0,288 - 0,72) \text{ м}^3/\text{ч}$ на кВт установленной мощности. Это сопоставимо с объемом дымовых газов (ориентировочно $2,5-3 \text{ м}^3/\text{ч}$ на кВт). Таким образом, объем вентиляционных выбросов неправомерно представлять как пренебрежимо малую величину, а определение степени воздействия ТЭС на атмосферный воздух без их учета не будет достаточно полным и объективным. Следовательно, вопросы разработки, исследования, совершенствования действующих и освоения новых способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду (в соответствии с п. 3 области исследования по паспорту специальности 05.14.14) в той или иной степени должны включать исследования воздействия на окружающую воздушную среду вентиляционных выбросов тепловой электростанции. Жесткая взаимосвязь данных вопросов установлена и регламентирующей данную область деятельности нормативной литературой. СП 90 [27] предписывает проектировать систем вентиляции и обеспыливания воздуха в зданиях и сооружениях ТЭС, как уже было отмечено, в соответствии с требованиями СП 60, в разделе 10 «Выбросы воздуха в атмосферу» которого предписана очистка содержащего загрязняющие вредные вещества

воздуха, выбрасываемого в атмосферу из систем местных отсосов и общеобменной вентиляции производственных помещений, и рассеивание в атмосфере остаточных количеств вредных веществ.

Ряд оборудования главного здания ТЭС может служить источником попадания загрязнителей в вентиляционные выбросы. Такое оборудование размещается и в котельном, и в машинном залах. В соответствии с п. 10.1.6 СП 90, системы отопления и вентиляции главного корпуса следует, как правило, проектировать самостоятельными для каждого энергоблока. При работе на угле в современных индивидуальных системах пылеприготовления с замкнутой сушилкой оборудование также располагается в одной ячейке с котлом. В зольном помещении на нулевой отметке, устанавливается оборудование системы шлакоудаления, и здесь же или в бункерном помещении размещаются мельницы и вентиляторы системы пылеприготовления. В соответствии с п. 10.1.22 СП 90, для уменьшения загазованности и запыленности котельного зала рекомендуется предусматривать удаление воздуха из него с помощью дутьевых вентиляторов кольцевыми (поясными) отсосами с воздуховодами равномерного всасывания, расположенными в верхней и средней зонах вертикальной поверхности котла. При этом удаляются и конвективные теплопоступления от поверхностей ограждения котла. Таким образом, вентиляционные выбросы каждой ячейки котельного отделения при работе на твердом топливе содержат взвешенные частицы, а при работе на газовом топливе – фугитивный метан. Его попадание в воздух котельного отделения из неплотностей соединений газопроводов и газооборудования в обязательном порядке учитывается нормативами. В соответствии с п. 10.1.18 СП 90, расход приточного воздуха в котельном отделении с котлами, работающими на газообразном топливе, а также в машинном отделении с газотурбинными установками, принимается не менее трехкратного воздухообмена в час в пределах ячейки каждого энергоблока. При этом система организации воздухообмена должна исключать возможность застоя и скопления газов в отдельных зонах помещения.

В машинном отделении с паровыми турбинами также имеют место источники загрязнения внетилиационных выбросов вредными газами и взвешенными частицами – на втором этаже могут располагаться блочные щиты управления, а на верхних этажах – бункера сырого топлива. К машинному залу может примыкать бункерное отделение с пылепроводами от мельниц к горелкам и ленточными питателями от бункеров к мельницам. Над бункерами вдоль котельного отделения размещается галерея раздающих транспортёров. СП 90, учитывая в обязательном порядке запыление воздуха машинного отделения, предписывает (п.п. 10.1.47, 10.1.52, 10.1.55, 10.1.62) при воздушном отоплении помещений галерей ленточных транспортеров, узлов пересыпки топлива, корпуса дробления топлива принимать направление и

скорости воздушных потоков с учетом предотвращения распространения пыли в помещениях. Указывается, что в узлах пересыпки, помещениях дробильных устройств, бункерной галерее главного корпуса следует предусматривать обеспыливание, а надземная часть разгрузочных устройств с вагоноопрокидывателями всех типов должна иметь обеспыливающую вытяжную вентиляцию (аспирацию). При этом воздух, удаляемый аспирационными установками, перед выбросом в атмосферу должен подвергаться очистке от пыли.

Нормативами СП 90 учитывается также возможность выделения оборудованием в воздух помещений ТЭС, дополнительно к угольной пыли, и других вредных веществ. Так например, по п. 10.1.68, при размещении помещений РУ внутри зданий допускается осуществлять приток воздуха из соседних помещений при отсутствии в них вредных веществ, а удаление воздуха – наружу или непосредственно в соседнее помещение, кроме РУ с маслonaполненным оборудованием и оборудованием, наполненным элегазом. Особо рассматривается возможность попадания последнего в воздух помещений ТЭС. В п. 10.1.73. предписывается рассчитывать вентиляцию помещений КРУЭ на ассимиляцию тепловыделений и разбавление элегаза до предельно допустимых концентраций. Наибольшее содержание элегаза в помещении при нормальных условиях не должно превышать 0,1 % к объему воздуха. При нарушении герметичности любого элемента элегазового оборудования вентиляция должна снижать концентрацию элегаза до ПДК не более чем за час

В соответствии с п.п. 10.1.31, 10.1.33, 10.1.67 СП 90, в помещениях щитов управления и средств вычислительной техники (СВТ) следует предусматривать кондиционирование воздуха с рециркуляцией и обязательным подпором воздуха не менее 20 Па, чтобы в помещениях щитов управления обеспечивались метеорологические условия (оптимальная температура, относительная влажность и скорость движения воздуха) в соответствии с технологическими и санитарно-гигиеническими требованиями к воздуху рабочей зоны. При этом в целом по рабочей зоне любых помещений ТЭС, согласно с п. 10.1.2 СП 90 [27], устанавливается нормируемость следующих санитарно-гигиенических условий: температурно-влажностных характеристик, подвижности и чистоты воздуха.

Соответственно, для создания надлежащего воздушного режима в каком-либо помещении необходимо обеспечение в нем конкретных нормативных значений таких параметров, как температура, влажность, скорость воздуха и концентрация загрязнителей, согласно с назначением этого помещения и климатологией. Кроме того, теплофизические, гидродинамические и др. параметры потоков зачастую бывают связаны с требованиями, направленными на исключение возможности возникновения чрезвычайных ситуаций по санитарно-гигиеническим, взрывопожароопасным и др. условиям.

В зависимости от климата местности, времени года и назначения помещения параметры надлежащего воздушного режима имеют некоторые пределы изменения. К примеру, надлежащий летний тепловлажностный режим помещения СВТ или АСУ ТП не станет таковым для зимнего режима производственного помещения машинного отделения. В равной степени, хотя и не столь очевидно, могут различаться требования к параметрам чистоты воздуха помещений, причем в некоторых случаях к помещениям производственного назначения могут предъявляться более высокие требования по чистоте воздуха. К примеру, надлежащий норматив запыленности на уровне ПДК атмосферного воздуха может оказаться недопустимо высоким для помещений с распределительными устройствами, для которых в соответствии с п. 10.1.70 СП 90 должна предусматриваться очистка поступающего вентиляционного воздуха. Таким образом, круг отраслевых нормативов ко всему комплексу помещений на территории ТЭС становится весьма широким, и для большей определенности нормативных требований область исследований данной работы ограничивается в основном помещениями производственного назначения.

Далее будут рассматриваться технологические вопросы, касающиеся разработки надлежащего температурно-влажностного и воздушного режимов в таких помещениях путем создания энергоэффективных технических решений вентиляционных систем. С технологией обеспечения надлежащего воздушного режима, в т.ч. с очистной обработкой воздуха до и после помещения, тесно увязана в рамках технологических вопросов вентиляции и кондиционирования воздуха техника его тепловлажностной обработки. Поэтому задачи создания надлежащего температурно-влажностного и воздушного режима в помещениях производственных зданий зачастую могут быть успешно решены путем разработки оптимальных технических решений касательно одного и того же вентиляционного устройства, например, по секциям фильтрации, орошения и подогрева кондиционера.

Нормативными документами, подлежащими обязательному соблюдению, в последнее время присваивается одинаковый статус технологических задач как традиционной для вентиляции и кондиционирования воздуха тепловлажностной обработке воздуха, так и его очистной обработке до и после помещения. Это в значительной мере связано с постоянным ухудшением экологической обстановки в городской среде, что можно видеть по эволюции требований во вступившем в силу с 01.01.2013 г. СП 60 [28]. Последний де-юре и де-факто является пересмотром действовавшего до сих пор СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха», в котором понятия метеорологических условий и поддержания чистоты воздуха были представлены отдельно. В СП 60 они сведены теперь в одно понятие «параметров воздуха в пределах допустимых норм», с единым требованием обеспечения

надлежащих (соответствующих нормативам) концентрационных и метеорологических параметров воздуха помещения.

Таким образом, нормативная база по технологическим вопросам жизнеобеспечения обслуживающего персонала конкретно для тепловых электростанций (СП 90) и для систем вентиляции и кондиционирования воздуха в целом (СП 60), касающаяся разработки надлежащего температурно-влажностного и воздушного режимов, принципиально имеют единую теоретическую основу. Объективной причиной этого является то, что каждый из режимов (тепловой, влажностный, воздушный) вкуче должны обеспечить безопасность жизнедеятельности человека и сохранность окружающей среды.

Однако каждый из них устанавливает свои определенные параметры состояния воздуха помещения, и методы их исследования имеют существенные различия. Это приводит к неохватному возрастанию сферы исследований. Вместе с тем благодаря принципиально единой теоретической основе здесь имеется возможность сужения сферы исследований без потери их качества путем корректного установления оптимального предмета исследований. Им должен стать такой из режимов, обобщенные результаты изучения которого, в принципе, могут быть использованы (с адекватным учетом специфики) и при оптимизации других режимов.

Необходимость сужения круга исследуемых проблем до одного из режимов связано с тем, что и после ограничения предмета исследования разработкой надлежащего воздушного режима только производственных помещений, изучаемая проблема продолжает еще оставаться чересчур многофункциональной. Номенклатура помещений производственного назначения ТЭС широка настолько, что не позволяет концентрировать исследования на поиск оптимальных по энергоэффективности, экологическим и санитарно-гигиеническим условиям технических решений для какой-либо одной отдельно взятой технологии с последующим распространением результатов на другие. Также малоинформативными окажутся результаты исследований, ориентированные на усредненные каким-либо способом параметры. Корректный выбор приоритетов по направлениям исследования может быть выполнен на основе анализа функционирования многофункциональной системы и рейтинговой оценки направлений повышения ее эффективности.

1.1.3 Инфографическое моделирование структурных взаимосвязей способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду

Возможность воздействия на параметры дымовых газов ТЭС с газоиспользующими парогенераторами в целях снижения содержания в них вредных веществ довольно ограничена. Способы сжигания газового топлива за прошедшие полвека работы отечественных ТЭС на

природном газе достигли в этом направлении достаточно высокого уровня совершенства. В противоположность этому технологии использования твердого топлива на электростанциях России, да и зарубежных стран, еще имеют значительные резервы совершенствования. В первую очередь это касается проблем оптимизации способов десульфуризации продуктов сгорания, а также снижения выброса золы и других взвешенных твердых частиц ($PM_{2.5}$, PM_{10}). Необходимо заметить, что загрязнители классов $PM_{2.5}$, PM_{10} поступают в окружающую ТЭС воздушную среду не только с дымовыми газами, но и с вентиляционными выбросами, в связи с чем необходимость их очистки, и в особенности – выбросов систем пылеприготовления, предписывается и актуализированным нормативом по тепловым электростанциям СП 90. Как было показано в предыдущем разделе, вентиляционные выбросы составляют заметную долю в общем объеме выбросов ТЭС (с учетом выброса дымовых газов). При этом в них могут присутствовать вещества глобального воздействия на окружающую среду – гексафторид серы SF_6 , включенный в список ПГ РКИК ООН из-за крайне высокого потенциала глобального потепления (GWP), и некоторые другие галогены. В связи с этим, в вопросы разработки, исследования, совершенствования действующих и освоения новых способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду должны включаться исследования воздействия на окружающую воздушную среду и вентиляционных выбросов тепловой электростанции.

Вместе с тем комплекс средств обработки газоздушных потоков на ТЭС наряду с очисткой отработанного воздуха производит также подготовку притока для создания надлежащего воздушного режима производственных помещений ТЭС, ввиду чего он представляет собой сложную взаимосвязанную систему функционирования множества единиц оборудования различного назначения. Для анализа общих условий существования изучаемой многофункциональной системы целесообразно использовать при нахождении основных функциональных связей между параметрами воздуха, входящими в производственное помещение и выходящими из него, адаптированную модель «черного ящика».

Обычная модель «черного ящика», применяемая в исследованиях физических систем неизвестной структуры, дает возможность проверки гипотез касательно функционирования этих систем на основе процедур, предполагаемо происходящих в них. Считают, что система представляет собой непроницаемый черный ящик с гипотетическими свойствами, и корректируют высказанные гипотезы по выходным откликам на входные возмущения.

В отличие от данного распространенного понятия модели «черного ящика», в исследуемом случае принцип функционирования «черного ящика» известен, но определенно не зафиксирован. Он может касаться оптимизации тепловой, влажностной, очистной (от

гомогенных и гетерогенных загрязнителей) и распределительной обработки воздуха в раздельности, в каких-то сочетаниях или вкупе. Функционирование такой системы может быть нефиксировано нацелено на обеспечение надлежащих параметров газов и воздуха – концентрации взрывоопасных и токсичных веществ и/или температуры, влажности, подвижности. При этом в зависимости от назначения помещения и технологии производства, времени года и климатической зоны перечисленные параметры могут изменяться в пределах интервалов значений, установленных нормативами. Адаптированному таким образом «черному ящику» свойственна принципиальная «просматриваемость», ввиду чего удобно проанализировать характер структурных связей изучаемого объекта с использованием инфографики (рис. 1.1...рис.1.6).

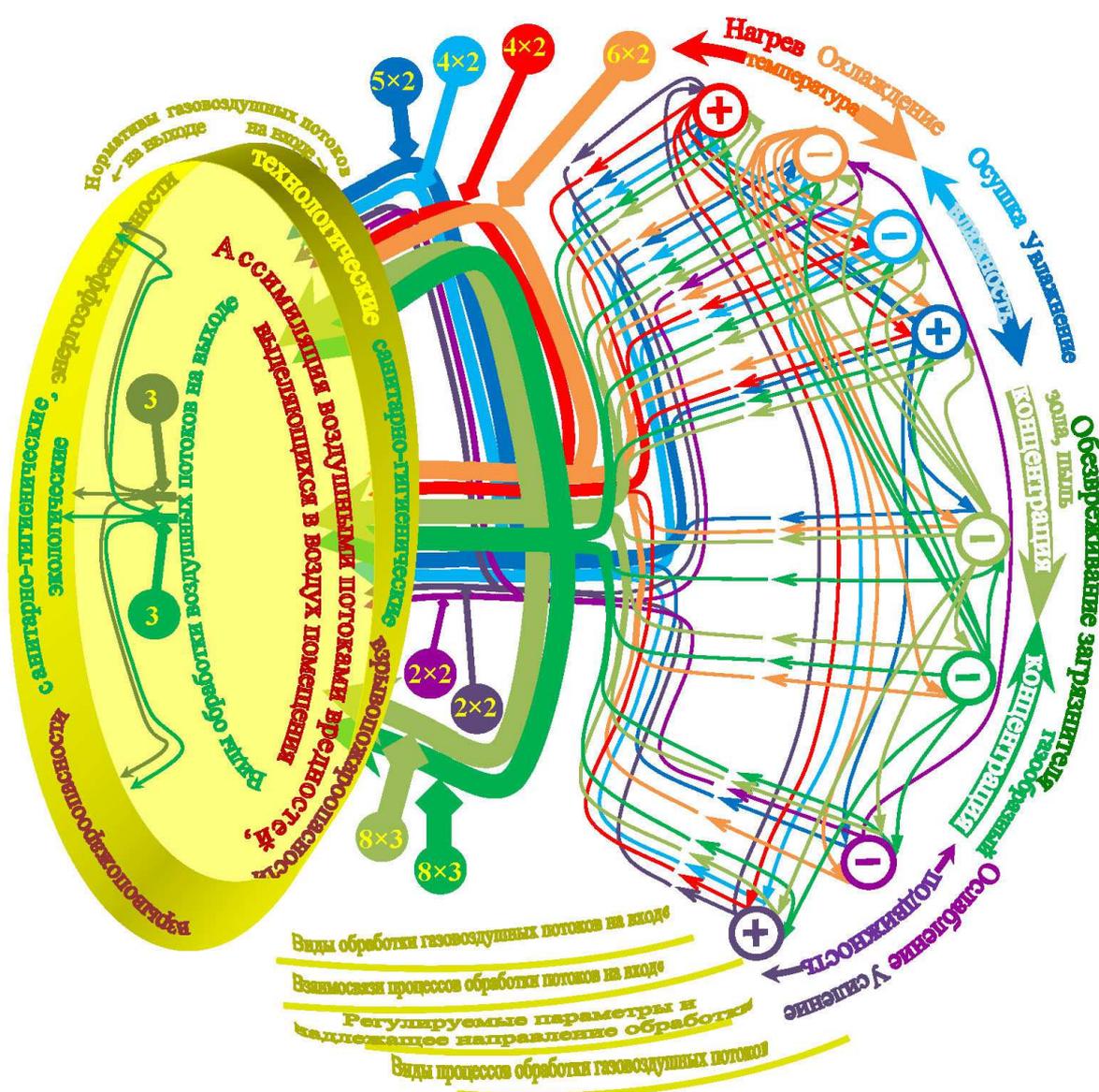


Рис. 1.1 Виды надлежащей (обеспечивающей нормативы) обработки воздушных потоков производственного помещения генерирующего предприятия. Составление рейтинга видов обработки по числу системных взаимосвязей и инфографика структуры связей

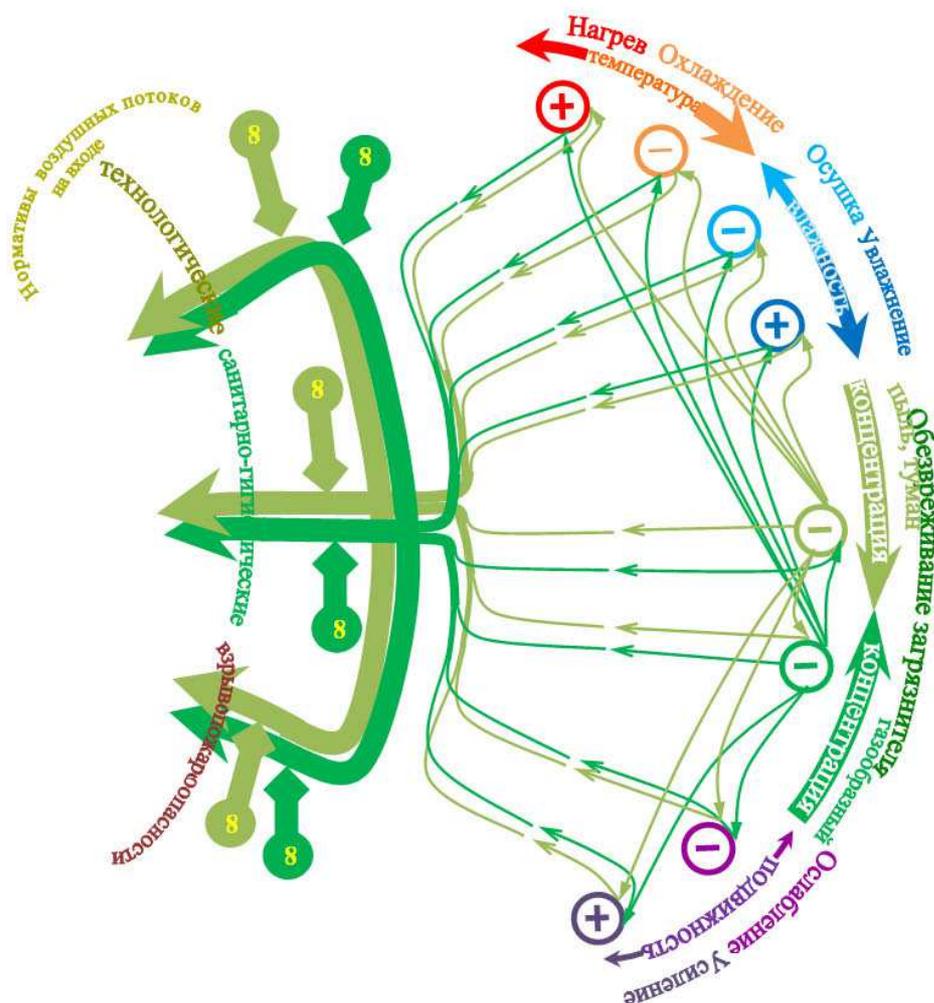


Рис. 1.2 Виды надлежащей обработки приточного воздуха для производственного помещения. Инфографика рейтинга процессов очистной обработки воздушных потоков по числу взаимосвязей с другими видами обработки

Оценочной единицей рейтинга по ней служит линия одинарной связи, толщиной 1,5 пт. Толщины линий и стрелок на входе в помещение масштабируются по числу возможных целесообразных взаимосвязей между видами обработки воздушных потоков, с добавлением единицы, означающей возможность и целесообразность отдельного применения данного вида обработки. Подсчет количества его целесообразных взаимосвязей с другими видами обработки обеспечивает возможность выявления по каждому виду максимального числа надлежащих (направленных на достижение требуемых нормативов) результатов. Это позволяет осуществить мягкий рейтинговый отбор среди видов обработки. Определенный по увеличенному на единицу числу возможных целесообразных взаимосвязей наибольший рейтинг – каждый по 8, имеют процессы пылеосаждения и обработки гомогенных примесей. Таким образом, в границах надлежащей обработки приточного воздуха с обеспечением нормативных параметров процессы обезвреживания примесей целесообразны в сочетании со всеми другими видами обработки – рис. 1.2.

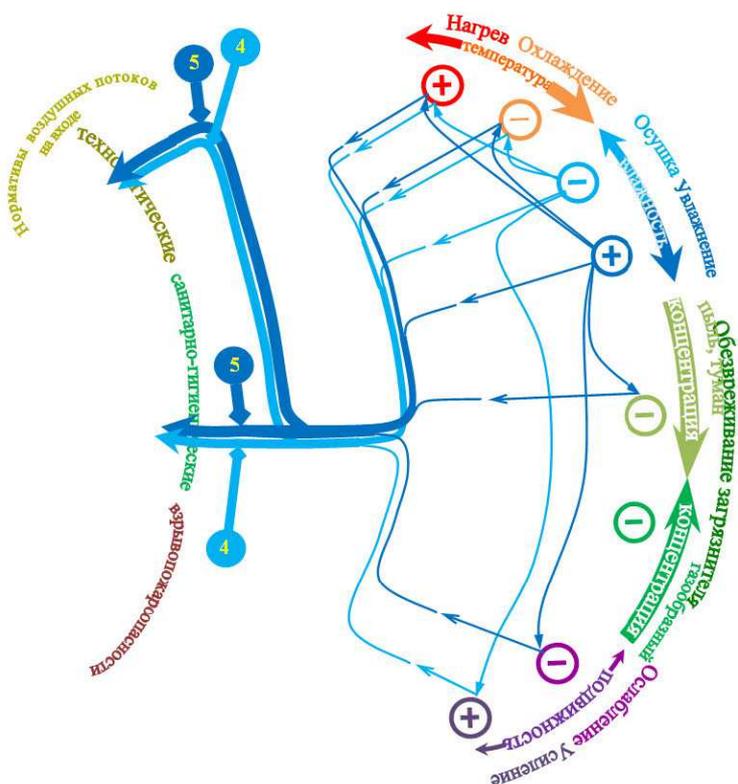


Рис. 1.3. Виды надлежащей обработки приточного воздуха для производственного помещения.
Инфографика рейтинга процессов влажностной обработки воздушных потоков по числу взаимосвязей с другими видами обработки

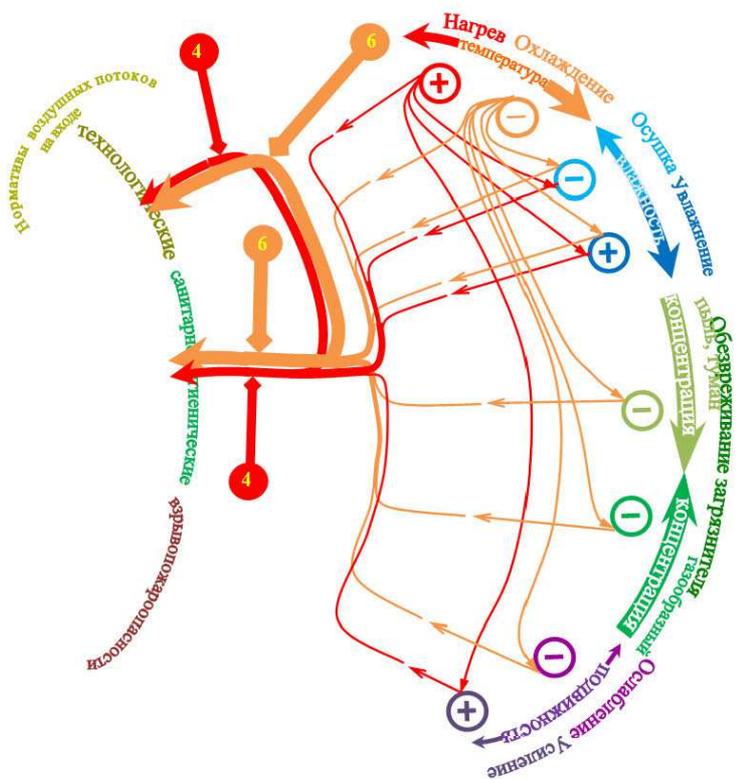


Рис.1.4. Виды надлежащей обработки приточного воздуха для производственного помещения.
Инфографика рейтинга процессов тепловой обработки воздушных потоков по числу взаимосвязей с другими видами обработки

За процессами очистки с рейтингами соответственно 6 и 5 следуют процессы охлаждения и увлажнения (рис. 1.3), далее с рейтингами по 4 каждый – процессы нагрева и осушки (рис.1.4).

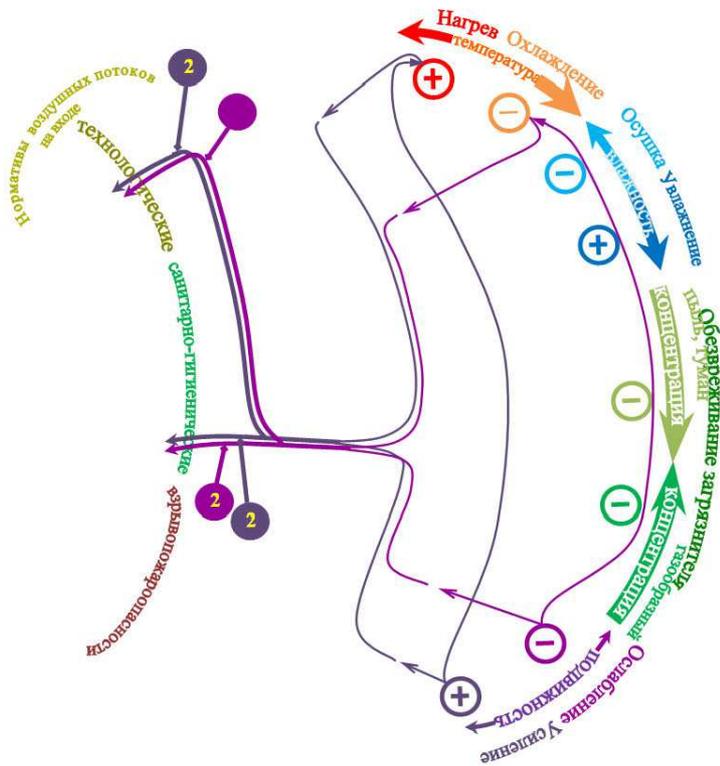


Рис.1.5. Виды надлежащей обработки приточного воздуха для производственного помещения. Инфографика рейтинга процессов регулирования подвижности воздушных потоков по числу взаимосвязей с другими видами обработки

Наименьшие рейтинги – по 2, у процессов изменения подвижности воздушных потоков: целесообразность увеличения и снижения скорости потока в помещении, кроме индивидуального варианта, усматривается еще в комбинации с повышением и понижением температуры подаваемого воздуха (рис.1.5).

На инфографиках, приведенных на рис. 1.1...рис.1.5, также наглядно представлены рейтинги процессов обработки по числу поддерживаемых ими нормативов притока. Здесь максимальный рейтинг – у каждого 3-х кратный, также принадлежит процессам очистки. Остальные виды обработки в состоянии поддерживать по 2 норматива – санитарно-гигиенический и технологический.

С учетом этого в целом по обработке приточного воздуха процессы пылеосаждения и обработки гомогенных примесей получают рейтинги по 24, процессы охлаждения и увлажнения – соответственно 12 и 10, процессы нагрева и осушки – каждый по 8, и процессы изменения подвижности воздушных потоков – каждый по 4.

Следовательно, по приточному воздуху суммарный рейтинг двух процессов очистки превышает сумму рейтингов оставшихся шести процессов обработки.

По применимости процессов для обеспечения требуемых нормативов вытяжки рейтинг имеют только процессы пылеосаждения и обработки гомогенных примесей – каждый по 3. В итоге рейтинг каждого из процессов очистки достигает 27 (рис.1.6).



Рис.1.6. Применимость видов надлежащей обработки для обеспечения требуемых параметров воздуха, удаляемого из производственного помещения. Инфографика рейтинга процессов очистной обработки воздушных потоков по числу поддерживаемых нормативов ветвыбросов

Проведенный выше системный анализ обнаруживает превосходство рейтинга очистной обработки газоздушных потоков по числу поддерживаемых нормативов и по взаимосвязям с другими видами обработки. Это означает, что очистная обработка перекрывает их по функциональности в рамках рассматриваемой многофункциональной системы вентиляции, призванной обеспечивать на ТЭС нормативные параметры газовых потоков производственных процессов и помещений различного назначения. Следовательно, общие выводы и закономерности, полученные в результате исследования других видов обработки, принципиально не удастся распространить на виды очистной обработки. И напротив, адаптация к другим видам обработки результатов исследований, полученных по очистной обработке, принципиально возможна. Это позволяет принять ее, как приоритетную, в качестве обобщенной информационной модели для всех видов обработки газоздушных потоков, направленных на обеспечение надлежащего режима газа и/или воздуха для любого технологического процесса и/или производственного помещения ТЭС.

В частности, качество надлежащего режима воздушных потоков внутри помещения в основном регламентируется граничными концентрационными нормативами на входе в «черный ящик» – производственное помещение, и на выходе из него. На входе количество вредных веществ лимитируется предельно допустимой концентрацией в воздухе рабочей зоны ($ПДК_{рз}$), а на выходе не должно превосходить предельно допустимого выброса (ПДВ). Поэтому граничными условиями, лимитирующими весь комплекс надлежащего (соответствующего нормативам по физическим параметрам микроклимата и по концентрациям) технологического

процесса обработки приточного воздуха помещения является входное содержание загрязнителя в наружном воздухе, поступающем из атмосферы, окружающей предприятие, и ПДК_{рз} во внутреннем воздухе, соответствующее данному производству. Граничными условиями технологического процесса обработки удаляемого из помещения воздуха является ПДК_{рз} и ПДВ.

Содержание загрязнителей в поступающем на обработку приточном воздухе зависит от качества наружного воздуха и организации воздухозабора. В соответствии с проектными нормативами (СП 60, п. 5.11), проектирование систем вентиляции и кондиционирования воздуха выполняется с учетом фоновых концентраций. При этом на входе в помещение приток должен быть загрязнен не более, чем на 30% ПДК_{рз}, чтобы обеспечить неперевышение ПДК_{рз} на рабочих местах.

В вопросах организации воздухозабора существенное влияние на загрязнение приточного воздуха оказывает размещение приемных устройств. Нетрудно заметить, что в этом отношении нормативы претерпели радикальные изменения. Если нормативы СНиП 41-01-2003 касались только предохранения от дисперсных загрязнителей, то сводом СП 60 (п. 7.3.2) предусматриваются, прежде всего, мероприятия по защите притока от попадания вредных газообразных продуктов.

Очевидно, что причина отмеченных изменений нормативов заключается в постоянном ухудшении качества городского воздуха промышленными, энергетическими и транспортными объектами. Сейчас зачастую в очистной обработке нуждается воздухозабор не только по стандартам «чистых» помещений, но и по нормативам помещений с обычными производственными процессами. Немаловажную роль здесь сыграло и ужесточение нормативов после вступления РФ в ВТО вследствие гармонизации отечественных норм и правил с международными стандартами. Теперь подобные требования предъявляются и к производственным выбросам в атмосферу, в особенности – к веществам, пребывание которых в атмосфере оказывает влияние на изменение климата планеты – загрязнителям глобального действия.

Известно, что состав атмосферы Земли всегда был подвержен непрерывным качественным и количественным изменениям из-за трансформации ее компонентов, а также вследствие обмена веществ с космосом и с другими частями биосферы. Эти явления могут реализоваться в результате природных процессов или/и антропогенной деятельности. При этом кроме отдельных случаев, имеющих характер катаклизмов, ингредиенты природного происхождения не вызывают катастрофического изменения окружающих условий, процессов и установившегося естественного хода событий в биосфере планеты в целом. Антропогенные же

загрязнители, напротив, не находят, за редким исключением, своего места в круговороте веществ без нарушения цикличности и замкнутости естественных процессов, чем вносят изменения в климат планеты. Некоторые компоненты антропогенных выбросов, в т.ч. – вентиляционных и технологических, характерных для производственных помещений и теплоисточников предприятий ТЭК, отнесены по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата (UN FCCC) к парниковым газам. Из них соединения, являющиеся галогенами, в определенных условиях, имеющих место на предприятиях ТЭК, могут трансформироваться в опасные для здоровья людей вещества. Наряду с этим такой парниковый газ, как диоксид углерода CO_2 , не токсичен, но может оказать глобальное воздействие на климат планеты, также ставя под сомнение возможность существования человечества. Далее задачи совершенствования очистной обработки воздуха рассматриваются и в свете современных проблем устойчивости развития человеческого сообщества, так как подобные компоненты представляют собой один из основных современных вызовов существованию человеческого сообщества.

Под очистной обработкой подразумевается очистка продуктов сгорания, вентиляционных выбросов или отработанной газовой среды, посредством улавливания загрязняющих компонентов или превращения их в нейтральные для человека и окружающей среды вещества. В понятие «системы очистки» входят технические очистные устройства – пылесадители и газоочистные установки, в совокупности с коммуникациями и вспомогательным оборудованием. Под оптимальной очисткой понимается максимально возможная при допустимом уровне затрат. Это достижимо, если при создании и эксплуатации очистной системы будут достаточно полно использованы различия свойств ингредиентов выброса, позволяющие отделить нейтральную часть от загрязняющих компонентов. В качестве компонентов, определяющих свойства нейтральной части, или газа-носителя, упрощенно принимаются нейтральные компоненты воздуха и выбросов – кислород, азот, водяной пар. В качестве загрязняющих компонентов производственных технологических и вентиляционных выбросов могут быть самые различные вещества, выделяющиеся в процессе производственной деятельности от оборудования, людей, конструктивных элементов помещений.

1.1.4 Теоретическая база методов классификации загрязнителей и выбросов, характерных для единого производственного цикла тепловых электростанций

Выбросы в целом различают по виду, составу, количеству, агрегатному состоянию, характеру появления и пребывания в атмосфере, влиянию на биосферу и множеству других признаков. Классификации производственных выбросов, пригодной для изучения их свойств с целью подбора способов очистки, пока нет. В стандартной классификации [29] выбросы в

атмосферу из источников загрязнения классифицируются по четырем признакам: по агрегатному состоянию, по химическому составу, по размеру частиц и по массе загрязнителя. Выбросы поделены по агрегатному состоянию на 3 группы (класса) – газообразные (А), жидкие (К) и твердые (Т), по химическому составу – на 26 групп, по размеру частиц – на 5 групп (1-ая менее $0,5 \times 10^{-6}$ м, 5-ая от 50×10^{-6} м) и по массе загрязняющего вещества – на 6 групп (1-ая менее 1 кг/ч, 6-ая от 10000 кг/ч). В характеристике по химическому составу приведены 22 вида химических соединений и классов химических соединений, смолистые вещества, сажа, пыль. Все остальное множество загрязнителей (более 1000 только по нормативам ПДК, а в целом – около 1 млн. видов веществ, выбрасываемых в атмосферу планеты) сведено в группу № 26 «Прочие».

Существующая классификация качественно лучше первоначального варианта, однако еще требует определенной оптимизации. Для гомогенных выбросов ТЭС было бы целесообразнее привязать газообразные загрязнители к нормативам ПДК, указав на классы опасности воздействия на организм человека без конкретизации каждого вещества, выделив при этом конкретно загрязнители глобального действия, например, такие как CO_2 , SF_6 . Принцип распределения взвешенных частиц по размеру, примененный в ГОСТе, малопонятен, ввиду чего на практике более употребительна классификация по US EPA. Для производственных выбросов ТЭС классификация выбросов по массе загрязняющего вещества в существующем виде недостаточно информативна. Ее следовало бы дополнить признаками источника выброса, как минимум, типом источника и физическими параметрами выброса.

В ГОСТе также приводится схема маркировки выбросов и загрязнителей, составляемой по индексам групп (рис. 1.7).

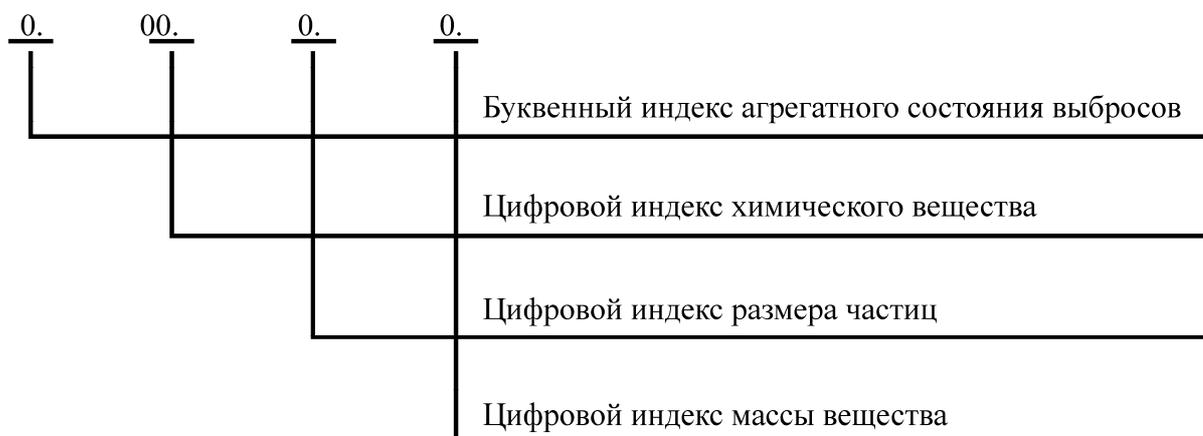


Рис. 1.7 Структура построения условного обозначения выбросов по ГОСТ 17.2.1.01-76 (Измененная редакция, Изм. №1).

По примеру, приведенному в стандарте, выброс, состоящий из сернистого ангидрида с массой 2000 кг/ч, кислоты размером частиц от 0,5 до 3 мкм и массой 50 кг/ч, сажи с размером частиц 1 мкм и массой 60 кг/ч, должен обозначаться как А.01.0.5.К.20.2.3.Т.23.2.3. К сожалению, многие виды выбросов и загрязнителей однозначно не идентифицируются и в измененной редакции стандарта. Так, продукты сгорания жидких и твердых топлив содержат золу, которая, как и в первоначальном варианте, не подходит индивидуально ни к одной из 26 групп в классе характеристик «по химическому составу». В том числе, ее нельзя отнести и к группе «Прочие», из-за содержания металлов и их соединений (включая свинец), органической и неорганической частей, сажистых и смолистых веществ, т.е. всего, что содержится в предыдущих группах.

В дополнение к исправлению указанных недостатков, в классификацию теперь должны быть включены оценки парниковых газов, что становится весьма актуальным и необходимым для создания систем очистки выбросов, оптимальных с позиции экологии и энергозатрат.

При создании очистных устройств необходимо учитывать весь комплекс присутствующих загрязнителей. Нельзя принимать за средство очистки гетерогенного выброса пылеосадительное устройство, оставляющее без обработки вредные газообразные ингредиенты, или аппарат, в котором обезвреживание газовых загрязнителей сопровождается образованием ядовитых туманов и дымов. Однако традиционно, в соответствии с исторически сложившимся опытом, вопросы создания и эксплуатации очистных систем рассматриваются для дисперсных и газовых загрязнителей отдельно. Объективная причина в том, что однозначная классификация систем обезвреживания по агрегатному состоянию обрабатываемых примесей или на основе процессов, происходящих в очистных устройствах, невозможна. Пока не найдено и других научно обоснованных признаков, позволяющих делить средства очистки на строго определенные группы. Поэтому в отечественной и зарубежной научно-технической литературе утвердились отдельные для дисперсных и газовых загрязнителей классификации, основанные на производственной терминологии.

Сепараторы взвешенных частиц вначале обычно классифицируют по способам сепарации, различая в общем случае аппараты гравитационные, инерционные сухие и мокрые, фильтрующие в пористом слое и в электрическом поле. Затем внутри каждой группы разделяют аппараты по конструкциям, типоразмерам, частным признакам. Так, например, циклонные устройства разделяют внутри класса инерционных сухих пылеуловителей на одиночные, групповые и батарейные (мультициклоны). Пористые фильтры различают по материалу и виду изделия – тканые и нетканые сетки из натуральных, полимерных и металлических волокон, слои волокнистых и сыпучих материалов, уплотненных металлических и металлокерамических

порошков, а также по конструкциям, типоразмерам и частным отличительным признакам. Представленная здесь в обобщенном виде классификация систем очистки дисперсных загрязнителей имеет ряд вариаций, число которых многократно возрастает при дальнейшей конкретизации каждого класса. Так, например, часто мокрые способы пылеочистки, имея много общего с инерционными способами и фильтрацией в пористом слое, и вместе с тем – ряд характерных особенностей, не обосновательно выделяются в отдельный класс.

Системы классификации выбросов, загрязнителей и средств очистки должны способствовать надлежащему подбору очистных аппаратов для систем очистки выбросов производственных источников. Примером такого подхода является оригинальная концепция классификации сепараторов взвешенных частиц, предложенная А.И. Пирумовым [30]. В ее основе лежит принцип деления пылезолоуловителей на классы по размерам эффективно улавливаемых частиц (таблица 1.1).

Указанные в таблице группа и медианный диаметр соответствуют характеристикам частиц, которые будут уловлены с максимальной степенью очистки в данном классе сепаратора. Данная таблица также наглядно иллюстрирует существующий потенциал эффективности средств пылеулавливания и дает мотивацию для их ускоренного развития в направлении удовлетворения современных требований к защите атмосферы. В соответствии с этой классификацией в таблице (таблица 1.2) дана характеристика наиболее употребительных пылезолоуловителей.

Таблица 1.1 Классификация пылезолоуловителей по размерам эффективно улавливаемых частиц

Класс сепаратора	I		II		III		IV		V
Минимальный размер эффективно улавливаемых частиц, мкм	0,3		2		4		8		20
Группа частиц по дисперсности	V	IV	IV	III	III	II	II	I	1
Медианный диаметр частиц, мкм	менее 1	1...10	1...10	10...40	10...40	40...120	40...120	более 120	более 120
Максимальная степень очистки, %	80	80...99	45...92	92...99	80...99	99...99,9	95...99,9	более 99,9	более 99

Таблица 1.2. Ориентировочные области применимости пылеуловителей по размерам улавливаемых частиц

Способ сепарации	Характеристики пылеуловителей									
	Тип пылеулавливающего устройства	Класс	Пределы применимости по D_{50} , мкм							
			1<	1...10	10...40	40...120	>120			
Гравитационный	пылеосадительные камеры	V								
Инерционный сухой	циклоны одиночные	IV								
	- групповые	IV								
	- батарейные	IV								
- мокрый	промыватели центробежные	IV								
	- ударные типа ПВМ	III								
	- - ротоклон	II, III								
	- Вентури низконапорные	II, III								
	- - высоконапорные	I, II								
	- пенные	II, III								
Фильтрация в пористом слое - в электрическом поле	фильтры зернистые	II, III								
	- тканые	I, II								
	- электрические однополюсные	II, III								
	- - многополюсные	I, II								

Классификация средств обработки гомогенных выбросов соответствует используемым при очистке процессам и по названиям практически совпадает с технологическими процессами и аппаратами промышленного производства. Очистные устройства в основном и подбираются из серийно выпускаемых аппаратов по каталогам предприятий химического машиностроения. Для очистки выбросов от газообразных примесей могут использоваться процессы конденсации, абсорбции, адсорбции, термической обработки (деструкции и окисления), а также специфические химические реакции. Устройства, предназначенные для реализации указанных процессов, не могут функционировать также без переноса тепловой энергии.

Совершенствование существующих классификаций способов и средств очистки затруднено проблемами принципиального характера. Разделение систем очистки по агрегатным состояниям обрабатываемых загрязнителей или по видам процессов потребует зафиксировать точные границы применимости тех или иных очистных систем и физико-химических процессов к определенным видам выбросов, что нецелесообразно и, по-видимому, невозможно.

Так, процессы гравитационного и инерционного осаждения дисперсной части выбросов могут быть использованы не только для пылеосаждения, но и для отделения газов с высокой плотностью, например, галогенидов тяжелых металлов. В то же время процессы охлаждения и конденсации, широко используемые в газоразделении, могут быть применены и при осаждении

дисперсных загрязнителей – например, можно укрупнять субмикронные конденсационные аэрозоли путем «вымораживания» полициклических ароматических углеводородов, коагуляции туманов.

Для удаления токсичных примесей наряду с физическими удачно используются и химические процессы. С помощью последних можно изменять в широких пределах физические свойства примесей (например, превращая исходные газообразные загрязнители в соединения с высокой температурой кипения) с целью облегчения их дальнейшего улавливания. Для превращения загрязнителей в безвредные вещества необходимо сочетание химических и физических процессов.

Поэтому не имеет смысла однозначно привязывать систему очистки к какому-либо конкретному агрегатному состоянию загрязнителя или виду процесса, необходимому для его обработки. Точных границ здесь провести невозможно, и по нашему мнению – нет необходимости, ввиду чего далее приведенная выше классификация способов и средств очистки будет использоваться в качестве основы.

Касательно способов газоочистки и пылезолоулавливания классификация очистных систем должна отражать возможности очистки ингредиентов, относящихся к парниковым газам. В нее необходимо включение таких характеристик, как степень очистки и комплексные показатели энергозатрат на нее, с объективным учетом затрат на компенсацию ущерба от выброса парниковых газов. Несмотря на актуальность проблемы для конструирования и эксплуатации систем очистки выбросов, подобных методов их оценки не существует. Проанализируем принципы и способы пылегазоочистки с этой позиции.

1.1.5 Общая характеристика принципов газоочистки и пылезолоосаждения

Очистка газов может основываться на двух возможных принципах – удалении вредных примесей из выбросов или превращении их в вещества, безвредные для человека и окружающей среды. Оба принципа реализуются через множество взаимосвязанных процессов, необходимые условия для которых должны быть созданы в соответствующих очистных устройствах. Подбор технологии очистки, т.е. необходимой последовательности процессов и параметров состояний, для обоих принципов основывается на отыскании наиболее существенных различий физико-химических свойств загрязнителей и газа-носителя (инертной части выбросов), что должно обеспечить минимум энергетических затрат на очистку.

Аэрозоли наиболее часто очищают посредством удаления дисперсных загрязнителей, для чего используется различие гравитационных, инерционных, количественных и других

характеристик молекул газа-носителя и взвешенных частиц. При гравитационном осаждении дисперсной части аэрозоля используются различия в гравитационных характеристиках частиц и молекул газовой среды аэрозольного выброса: на перемещениях молекулы действие турбулентной и молекулярной диффузии (в конечном счете – броуновского движения) сказывается намного сильнее действия гравитационного поля Земли, а частицы аэрозоля намного превосходят молекулы по массе и сильнее ощущают его действие. Поэтому при отсутствии заметной турбулентной диффузии они оседают, отделяясь тем самым от газовой среды.

При инерционном осаждении, также основанном на различии масс молекул газовой среды и частиц аэрозоля, находят применение те из инерционных свойств вещества, которые становятся заметны при неравномерном и не прямолинейном передвижении потока аэрозоля. В прямолинейных потоках средние скорости и направления движения молекул и частиц приблизительно одинаковы, ввиду чего дисперсная часть неинтенсивно отделяется от газовой среды. В криволинейных каналах и при огибании препятствий молекулы газа-носителя из-за небольшой инерционности создают эквидистантные стенкам линии тока, тогда как значительно более инерционные взвешенные частицы могут на изгибах линий тока сходить по касательным, сохраняя прежнее направление движения. При этом отделение дисперсной части тем существеннее, чем больше сила инерции, т.е. чем больше массы и скорости частиц и чем меньше радиус кривизны траектории движения потока.

На практике инерционное осаждение реализуется при циклонной сепарации и осаждении на препятствиях. В сухих циклонных сепараторах - циклонах поток аэрозоля движется по сложной спирально-кольцевой траектории. В циклонах небольшого диаметра из него, в принципе, возможно выделение частиц мельче 10^{-6} м, однако такие режимы сепарации в практике газоочистки обычно не применяются из-за высоких энергозатрат и технических сложностей. При приемлемых энергозатратах в циклонах отделяют частицы средних (от 10...15 мкм) и крупных размеров.

Осаждение на препятствиях в сухом пористом слое аналогично осаждению в циклонах. Пористые слои создаются зернистыми элементами, волокнами или межниточным пространством ткани с осевшей на ней пылью. Каналы в пористых слоях специально не формируются и могут иметь различные конфигурации, или заканчиваться тупиками. Молекулы газового потока при соответствующем давлении перед слоем огибают препятствия любого радиуса кривизны и проходят через каналы любого размера, а дисперсная часть с размерами более 0,1...0,5 мкм задерживается, так как не может вследствие своей инерционности обойти препятствие или застревает в канале из-за превышения его размера. Недостатком пористых

фильтров, особенно волокнистых, обеспечивающих наивысшую степень очистки, является высокое сопротивление и большие энергозатраты.

Таким образом, проведенная качественная оценка циклонных сепараторов и пористых фильтров с точки зрения их фильтрационного действия показывает, что оно основано на одном и том же физическом явлении. Однако эти способы имеют взаимодополняющие преимущества и недостатки: у циклонов это невысокая затрата энергии и возможность очистки пыли только средних и крупных размеров; у фильтров – возможность очистки мелкой пыли, но высокая затрата энергии. Это указывает на очевидную перспективность поиска их сочетания, которое обеспечило бы взаимную компенсацию недостатков, что и принимается как одна из задач исследования.

Освобождение от загрязнителей гомогенных выбросов производится в основном тепловыми системами защиты окружающей среды с помощью процессов конденсации, абсорбции, адсорбции, термической обработки. При этом могут быть реализованы оба принципа очистки – удаление или/и превращение загрязнителей в безвредные вещества, в зависимости от того, какой из них выгоден в конкретных условиях.

После обработки в конденсаторе газофазный загрязнитель изменяет агрегатное состояние, но продолжает оставаться в составе выбросов. Для его удаления из инертного газового потока необходимо осадительное устройство. Энергозатраты на конденсацию зависят от различия температур и давлений, при которых компоненты газообразного загрязнителя и инертного газа-носителя переходят в конденсированное состояние. Температура кипения многих инертных и вредных газов достаточно низка. На практике посредством охлаждения и повышения давления целесообразно конденсировать загрязнители с высокой температурой кипения. Обычно конденсацию используют для выбросов, содержащих галогениды металлов и растворители с высокими начальными концентрациями (порядка 10^4 мг/м³), рассчитывая на степень их извлечения до 50...70%. Более глубокая очистка принципиально возможна, но технически сложна и затратна.

В процессах сорбции (абсорбции, адсорбции) газовый загрязнитель, попадая в конденсированную сорбирующую среду, конденсируется и отделяется от инертного газового потока. Абсорбционная очистка выбросов основана на различии растворимости загрязняющих и инертных ингредиентов в абсорбенте. Область применения абсорбции ограничивается очисткой выбросов с легкорастворимыми в абсорбенте компонентами. Растворение интенсивно только в состояниях, далеких от насыщения абсорбента, т.е. при высоких химических потенциалах загрязнителя. Поэтому повышение производительности установок обеспечивается в основном за счет увеличения площади контакта абсорбента и обрабатываемого выбросов. К

числу устройств распыла абсорбента, оптимальных по энергозатратам, принадлежит класс современных пористых распылителей, начало исследования которых было положено Николаевым Н.А. и Колесником А.А. ([31])

При адсорбционной обработке газообразный загрязнитель, как и при абсорбции, одновременно конденсируется и выводится из газового потока. Однако конденсация (осаждение) молекул из газовой среды осуществляется за счет притяжения поверхностью адсорбента. Возможность очистки выбросов заключена в различии силы притяжения молекул легко и трудно конденсирующихся газов. Основные инертные компоненты газовых выбросов (за исключением паров воды) относятся к трудно конденсируемым и практически не задерживаются адсорбентами. Вместе с ними не улавливается ряд легких газов – H_2 , He, NO, CO, CH_4 и некоторые другие, среди которых есть токсичные (CO) и парниковые (CH_4). Несмотря на это, адсорбция все же может считаться наиболее универсальным средством очистки, и применима к подавляющему большинству газообразных загрязнителей. Адсорбция – единственный эффективный способ обработки выбросов с низкими концентрациями загрязнителей. Хотя процесс адсорбции, как и абсорбция, идет только до насыщения сорбента, а движущая сила процесса также пропорциональна отклонению от равновесного состояния, т.е. химическому потенциалу, эффективность обработки газов с низкими концентрациями загрязнителей обеспечивается при адсорбции высокоразвитой поверхностью массообмена. Удельная поверхность адсорбентов достигает $1 \text{ км}^2/\text{кг}$ и более, и их приближение к насыщению начинает заметно сказываться на адсорбции загрязнителя при значительно меньших, чем в случае абсорбции, отклонениях от равновесного состояния, и следовательно, при меньших концентрациях. Адсорбция, сопровождающаяся соответствующей химической реакцией – химическая адсорбция, используется для превращения загрязнителей в безвредные компоненты, а также для обработки выбросов с целью удаления загрязняющих компонентов. Например, используя адсорбент, импрегнированный тяжелым галогеном – йодом, можно перевести легкие углеводороды в йодзамещенные исходных соединений, которые в дальнейшем легко сконденсировать и уловить. Вместе с тем, область применения хемосорбции теперь необходимо ограничивать с точки зрения парникового эффекта, как например, при использовании шамота, импрегнированного перекисными соединениями марганца, для окисления оксида углерода (II) CO до оксида углерода (IV) CO_2 .

При термоокислительной обработке реализуется принцип обезвреживания газообразных загрязнителей с конверсией вредных компонентов выбросов в безвредные. Газофазный процесс окисления (огневая обработка, дожигание) должен быть организован так, чтобы загрязнители реагировали с окислителем в газовой фазе (в объеме топочных устройств) при

соответствующей их воспламенению температуре, поддерживаемой в топке за счет сжигания топлива в специально разработанных горелочных устройствах. Термоокисление на границе раздела фаз (термокаталитическое окисление) проводится в установках, состоящих из топок с горелками и реакторов с каталитическими насадками. Катализаторы способствуют ускорению реакций окисления при температуре ниже температуры воспламенения обезвреживаемых загрязнителей.

Обезвреживание выбросов посредством термоокисления основано на различной категории токсичности продуктов взаимодействия окислителя с загрязнителями и инертной частью выбросов. Относительно безвредные продукты могут образоваться только в реакциях загрязнителей с кислородом. Конечные и промежуточные продукты реакций любых загрязняющих компонентов с другими окислителями (фтором, хлором и т.п.), принципиально не могут быть безвредными для окружающей среды. Окисляя вещество при высокой температуре, можно полагать, что оно обезвреживается, если продукты его реакции с кислородом безвредны, т.е. не могут нанести ущерб окружающей среде и здоровью людей. В указанных случаях принципиально невозможно достичь, во-первых, полного окисления, и во-вторых, нетоксичных продуктов окисления при любом исходе процесса. Промежуточные продукты цепных реакций термоокисления углеводородов с участием в них неорганических элементов часто оказываются более токсичными, чем исходные загрязнители и продукты их полного окисления. По схожей причине термоокисление кислородом принципиально не может служить универсальным средством очистки выбросов. Оно применимо для загрязнителей всех агрегатных состояний, но ограничено составом обрабатываемого выброса, который не должен содержать соединения с какими-либо другими элементами, кроме углерода, водорода и кислорода. Тем самым область его применения ограничивается очисткой выбросов, загрязненных водородом H_2 , оксидом углерода CO , углеводородами C_mH_n и (или) их кислородпроизводными (КПУ) $C_mH_nO_l$. При термоокислительной обработке любых других соединений принципиально невозможно получить безвредные продукты их реакций с кислородом или с другими окислителями.

Строго говоря, и в этом случае термообработка не полностью избавляет нас от токсичных веществ – процесс всегда сопровождается химическим недожогом. Наиболее заметно при этом в продуктах термоокисления присутствие оксида углерода CO , могут быть еще формальдегид, акролеин и другие альдегиды, кетоны, органические кислоты, циклические и полициклические углеводороды, в т.ч. канцерогенно активные. В условиях термообработки окислитель реагирует не только с загрязнителями, но в определенной степени и с отдельными компонентами инертной (безвредной) части выбросов и топлива, причем продукты реакций

могут быть и токсичными. Всегда происходит окисление азота, содержащегося в воздухе и топливе, хотя в современных устройствах термообезвреживания химический недожог и образование оксидов азота NO_x могут быть сведены к минимуму.

Область применения термоокислительной обработки, как и в случае с адсорбцией, необходимо оценить и с точки зрения парникового эффекта. С этой позиции выброс в атмосферу CO_2 не оценивается как безвредный для нашей планеты. Россией подписан Киотский протокол, признающий глобальное воздействие техногенного выброса CO_2 на окружающую среду, ведущее к необратимому изменению климата планеты, и с этим приняты обязательства по сокращению его выброса. Теперь необходимо учитывать это обстоятельство при выборе систем обезвреживания, что сокращает область применения топливоиспользующих систем очистки выбросов. Хотя утверждение о глобальности влияния техногенного выброса CO_2 на климат планеты не бесспорно (и недоказуемо, как и обратное), физическая возможность создания «парникового» эффекта им и любыми другими трехатомными газами (в т.ч. другим нетоксичным компонентом продуктов сгорания – парами воды H_2O), достаточно интенсивно поглощающими излучаемую с поверхности Земли тепловую энергию, в доказательстве не нуждается. В пользу систем термообезвреживания может быть лишь то, что область их применения широка не настолько, чтобы поступление от них в окружающую среду CO_2 можно было бы сопоставлять с ущербом от уничтожаемых исходных загрязнителей.

Из числа парниковых газов наиболее характерным компонентом выбросов энергетических теплогенераторов и топливоиспользующих очистных систем является диоксид углерода CO_2 . Вместе с тем, как показывает существующий опыт, в топливоиспользующие установки могут направлять на обработку ряд химических соединений, которые принципиально невозможно обезвредить термоокислением. В особенности это касается систем огневого и термokatалитического окисления. В них зачастую пытаются обработать отбросные газы, содержащие серу, фосфор, галогены, которые по тем или иным причинам не удалось стравить в атмосферу без очистки. Эта проблема не относится к простым, ввиду чего ошибочные рекомендации направлять на термообработку, например, галогены, нередки ([32, 33, 34, 35, 36, 37, 38]) и встречаются, к сожалению, даже в работах опытных специалистов ([39]). Необходимо тщательное исследование указанной задачи. Подвергая термообработке вещества, в составе которых имеются какие-либо другие элементы, кроме С, О, Н, можно конвертировать инженерно-экологические технологии, к которым относятся и топливоиспользующие системы очистки выбросов, в экоцидные, ввиду образования высокотоксичных галогенсодержащих соединений, вплоть до боевых отравляющих веществ и загрязнителей глобального воздействия – галогенов из списка ООН от 1986 г. как влияющих на озоновый слой, а также списка

парниковых газов по документам UN FCCC. Последние могут усилить парниковый эффект выбросов систем очистки, дополняя действие постоянных компонентов продуктов сгорания CO_2 и H_2O .

Так как галогенсодержащие выбросы не могут быть обезврежены только термообработкой, необходимо подобрать оптимальное сочетание способов, обеспечивающее в конечном итоге очистку с радикальным извлечением галогенов. Задача разработки комплексной системы очистки выбросов с указанными характеристиками, отвечающей современным вызовам устойчивости развития, поставлена в качестве одной из основных для данного исследования.

Выбросы топливоиспользующих устройств в составе промышленных теплоисточников, работающих не на газообразном топливе, содержат, в дополнение к перечисленным выше газообразным, загрязнители в конденсированной фазе. Парогенераторы ТЭС традиционно относятся к неквалифицированным потребителям природного газа и по рентабельности несопоставимы с прибыльными сферами его вложения, например, с экспортом. Поэтому в ближайшем будущем очевидно прогнозируется снижение доли газообразного и увеличение доли твердого топлива в топливном балансе. Ввиду дефицита высококачественных углей предполагается сжигание на электростанциях топлив с высоким содержанием балласта (канско-ачинских и др.); возможно и использование «соленых углей». Это вызывает, с учетом больших объемов продуктов сгорания, сбрасываемых ТЭС (порядка $10^3 \text{ м}^3/\text{с}$ и более), необходимость создания очистных устройств дисперсных загрязнителей нового поколения, характеризующихся повышенной эффективностью, т.е. высокой степенью очистки при приемлемом уровне затрат. Так как парогенераторы ТЭС являются и одними из наиболее крупных источников CO_2 , выход мог бы быть найден в комплексном сбалансированном подходе к очистке выбросов. Так например, рост затрат на золоулавливание может покрываться поступлениями средств от снижения выброса CO_2 за счет выполнения энергоресурсосберегающих, организационных и др. мероприятий. Успешное выполнение теплоэнергетическими предприятиями подобных сложных задач возможно при новом уровне инвестиционной политики государства в отношении предприятий, основанном на максимально объективном подходе к распределению инвестиций. В свою очередь, такой подход невозможен без показателей, позволяющих проводить объективную оценку совершенства очистных систем, комплексно учитывающую, в соответствии с современными вызовами устойчивости развития и требованиями к защите окружающей среды, выброс парниковых газов и др. загрязняющих веществ. Такие показатели в настоящее время отсутствуют, и их разработка также принимается в качестве одной из задач данного исследования.

1.2 Теоретическая база методов определения предельно допустимого выброса (ПДВ) производственных объектов ТЭС

Контроль систем газоочистки должен сводиться, в конечном счете, к проверке обеспечения ими обезвреживания выбросов, т.е. достижения состояния, безвредного для объектов окружающей среды – людей, продуктов их производственной деятельности, флоры, фауны, природного ландшафта. В РФ, США и странах ЕС основным средством контроля служит сопоставление концентраций определенного числа выбрасываемых загрязнителей с принятым за допустимый узаконенным уровнем загрязнения ими атмосферы. В основу российского природоохранного законодательства по нормированию загрязнения атмосферы была положена гарантия экологической безопасности при неблагоприятном воздействии загрязненного воздуха на человека и природную среду.

Отношения, возникающие в пределах территории РФ, на континентальном шельфе и в исключительной экономической зоне РФ при осуществлении хозяйственной и иной деятельности, связанной с воздействием на природную среду, регулирует Федеральный закон N 7 – ФЗ "Об охране окружающей среды" [40]. Государственное регулирование воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду осуществляется путем нормирования в области охраны окружающей среды, гарантирующего сохранение благоприятной окружающей среды и обеспечение экологической безопасности. Под нормированием понимают установление нормативов качества окружающей среды, нормативов допустимого воздействия на окружающую среду и иных нормативов в области охраны окружающей среды, а также нормативных документов в области охраны окружающей среды. Нормативы и нормативные документы разрабатываются, утверждаются и вводятся в действие на основе современных достижений науки и техники с учетом международных правил и стандартов в области охраны окружающей среды.

К нормативам качества окружающей среды относятся нормативы, установленные в соответствии с химическими и физическими показателями состояния окружающей среды, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК) химических веществ, показатели уровней радиоактивности и тепла; иные нормативы качества окружающей среды.

Нормативы допустимого воздействия устанавливаются для природопользователей – юридических и физических лиц, с целью предотвращения негативного воздействия на окружающую среду хозяйственной и иной деятельности. На воздушную среду устанавливаются следующие нормативы допустимого воздействия: нормативы допустимых выбросов (предельно допустимых выбросов – ПДВ) веществ и микроорганизмов; нормативы допустимых

физических воздействий; нормативы допустимой антропогенной нагрузки; нормативы иного допустимого воздействия при осуществлении хозяйственной и иной деятельности.

Нормативы допустимых выбросов веществ и микроорганизмов устанавливаются для стационарных, передвижных и иных источников воздействия на окружающую среду субъектами хозяйственной и иной деятельности исходя из нормативов допустимой антропогенной нагрузки на окружающую среду, нормативов качества воздушной среды, а также технологических нормативов. Технологические нормативы устанавливаются на основе использования наилучших существующих технологий с учетом экономических и социальных факторов. При невозможности соблюдения нормативов допустимых выбросов веществ и микроорганизмов могут устанавливаться лимиты на выбросы на основе разрешений, действующих только в период проведения мероприятий по охране окружающей среды, тов с учетом поэтапного достижения установленных нормативов допустимых выбросов. Установление лимитов допускается только при наличии планов снижения выбросов, согласованных с органами исполнительной власти, осуществляющими государственное управление в области охраны окружающей среды.

Под нормативами качества окружающей среды Федеральным законом подразумеваются нормативы, которые установлены в соответствии с физическими, химическими, биологическими и иными показателями для оценки состояния окружающей среды и при соблюдении которых обеспечивается благоприятная окружающая среда. Нормативы допустимых выбросов химических веществ, в том числе радиоактивных, иных веществ и микроорганизмов должны быть установлены для субъектов хозяйственной и иной деятельности с учетом технологических нормативов так, чтобы при их соблюдении обеспечивались нормативы качества окружающей среды.

Технологический норматив допустимых выбросов веществ и микроорганизмов устанавливается для стационарных, передвижных и иных источников, технологических процессов, оборудования и отражает допустимую массу выбросов в расчете на единицу выпускаемой продукции.

Нормативы ПДК химических веществ, в том числе радиоактивных, иных веществ и микроорганизмов, устанавливаются в соответствии с показателями предельно допустимого содержания веществ и микроорганизмов в воздушной среде из предположения, что их несоблюдение может привести к деградации естественных экологических систем. Нормативы допустимых физических воздействий устанавливаются в соответствии с уровнями допустимого воздействия физических факторов на окружающую среду, в расчете на то, что при их соблюдении обеспечиваются нормативы качества окружающей среды.

Таким образом, загрязнение окружающей среды законодательно нормируется как разновидность неблагоприятных воздействий, из предположения о существовании допустимых норм вредных воздействий на природу, гарантирующих экологическую безопасность населения, сохранение генофонда и обеспечивающих рациональное использование и воспроизводство природных ресурсов в условиях устойчивого развития хозяйственной деятельности. Нормативы загрязнения природной среды отражают систему моральных ценностей и уровень научно-технического развития общества, в соответствии с которыми оно ограничивает свои экономические возможности, определяя объемы выделяемых средств на совершенствование технологий, очистных сооружений и техники контроля, на организационные мероприятия по охране окружающей среды и т.д. Этим нормативам придается форма медицинских показателей, которые обосновывают гипотетически или статистикой заболеваний и смертности.

Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест, а также при размещении, проектировании, строительстве и вводе и эксплуатацию новых и реконструируемых объектов, при техническом перевооружении действующих объектов, представлены в [41]. Основой регулирования качества атмосферного воздуха населенных мест являются гигиенические нормативы – ПДК атмосферных загрязнений химических и биологических веществ, соблюдение которых обеспечивает отсутствие прямого и косвенного влияния на здоровье населения и условия его проживания. Для отдельных веществ допускается использование ориентировочных безопасных уровней воздействия (ОБУВ), для которых устанавливаются сроки их действия.

В итоге фактическими критериями, на которых базируется оценка совершенства конструирования, проектирования и эксплуатации очистных систем, в нашей стране являются ПДК обезвреживаемых загрязнителей и ПДВ источников загрязнения. Подобная оценка источников производственных выбросов ТЭС может быть объективной для таких производств, загрязнители которых оказывают непосредственное влияние на здоровье людей. Очевидно, что к источникам выбросов, загрязнители которых наносят локальный ущерб иного вида или оказывают глобальное воздействие на природу, оценка по ПДК не применима. Последнее имеет особое значение для выбросов, характерных для единого производственного цикла тепловых электростанций, поскольку даже дымовые газы содержат наряду с токсичными загрязнителями нетоксичные загрязнители глобального действия.

1.2.1 Методы определения нормативов загрязнения атмосферного воздуха компонентами производственных выбросов ТЭС в России, ЕС и США

Оценим уровень совершенства и теоретической обоснованности ПДК в различных странах. В СССР для обоснования ПДК был принят тезис акад. В.Я. Рязанова (по [42]) о существовании определенной концентрации токсичного химического соединения, ниже которого оно не оказывает вредного воздействия на организм человека (или же замена разрушенных клеток и органов происходит без патологических последствий). В принципе он сводится к известному высказыванию Парацельса «всё – яд, важна доза» и имеет подтверждения в обыденной жизни. Вместе с тем построенная на этой концепции система нормирования загрязнения атмосферного воздуха и воздуха рабочей зоны не бесспорна вследствие индивидуальности и неоднозначности результатов воздействия вредных веществ на организмы. Ее использование для гигиенического нормирования качества воздушной среды и контроля загрязнения атмосферы в государственных масштабах традиционно продолжается только в ряде стран, входящих в географическую зону влияния бывш. СССР.

В странах со стабильной рыночной экономикой, в т. ч. отнесенных в классификации UN FССС к странам-донорам, сложились иные, но так же произвольные системы обоснования допустимости загрязнения. В США концепция загрязнения воздушной среды основывается непосредственно на балансе между финансовыми затратами и прибылью от снижения загрязнения, включая рекламные расходы и доходы от роста спроса на экологичную продукцию. Нормативы допустимых концентраций устанавливаются обособленно в масштабах штатов при наличии данных о корреляции изменений уровня смертности и концентрации загрязнителя, или по факту воздействия на здоровье максимального количества работников, имеющих дело с данным загрязнителем [43]. Пока в США только приступают к учету загрязнения выбросов парниковыми газами. В зоне ЕС, напротив, большее внимание обращается на выброс парниковых газов, а не токсичных.

Норматив загрязнения окружающей среды всегда служит обобщенным показателем соотношения научно-технического и культурного уровня развития данного сообщества. С позиции рассматриваемого вопроса научно-технический уровень может быть в первом приближении оценен показателями производственно-технологического и научного развития государства, включая возможность обеспечения соответствующего обезвреживания выбросов с контролем соблюдения пределов воздействия на Природу. Культурный уровень выражается показателями биоэтического характера, представляющими отношения государства к Природе и гражданам. Нормативы загрязнения подразумевают возможность экономического обеспечения технологических процессов на уровне предельно допустимого воздействия на Природу.

Биоэтическим показателем служит обоснованность норматива. Научное обоснование уровня допустимого загрязнения воздуха тем или иным веществом можно признать этически допустимым, если установлены истинная концентрация загрязнителя, действие которой на организм человека может быть допущено без какого-либо ущерба, и концентрация, начиная с которой загрязнитель начинает наносить непоправимый ущерб. При этом методологии обоснования доз одноразовой и постоянной экспозиции токсичного вещества должны различаться.

Вместе с тем, даже для распространенных загрязнителей нахождение показателей допустимого загрязнения в государственных масштабах сопряжено с принципиальными проблемами. Проблемы объективного характера заключаются, прежде всего, в большом разнообразии видов загрязнителей в атмосфере. Их токсические свойства и концентрации в различных сочетаниях могут различаться на порядки. Еще сложнее преодоление проблем, связанных с неоднозначностью реакции на токсикогены не только различных людей, но и одного человека в течение жизни. На настоящее время используются ПДК_{мр}, установленные статистическими методами по показателям реакций организмов испытываемых групп людей. Это влечет за собой возникновение этической проблемы ограничения прав большинства индивидуумов человеческого сообщества на качество воздуха, обеспечивающего их нормальное существование как биологического вида. Средние показатели отдельной группы волонтеров, принятые как постоянные величины на длительные периоды (десятилетия), смогут точно совпадать с показателями лишь небольшого числа индивидуумов.

Задача нахождения ПДК еще усложняется при периодически повторяющемся или постоянном действии загрязнителя на организм. Здесь основным инструментарием гигиенических исследований является затравка мышей и др. животных через органы дыхания, пищеварения, кожный покров, по результатам которых устанавливаются величины ПДК воздуха рабочей зоны (ПДК_{рз}) и населенных мест – ПДК_{мр} и ПДК_{сс} (среднесуточной). Среди них принципиальную возможность точного определения имеет только ПДК_{мр}. Эта концентрация при вдыхании в течение 30 минут не должна оказывать рефлекторных (в т.ч. субсенсорных) реакций в организме человека. Гарантия же допустимости загрязнения воздуха до уровня ПДК_{рз} формулируется весьма неопределенным образом. При ежедневной (кроме выходных дней) работе с продолжительностью не более 41 часа в неделю в течение всего рабочего стажа концентрации, не превышающие ПДК_{рз}, не должны вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, за время работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и будущего поколений [44]. Один из существенных недостатков обоснования ПДК_{рз} в нереальности и бесполезности тотального учета отклонений здоровья всех работающих,

пенсионеров и будущих поколений. Эффект от воздействия загрязнителя в скором времени после начала наблюдения размоется эффектами, не связанными с производственной деятельностью наблюдаемых.

Некорректность ПДК, порождаемую практической неосуществимостью предлагаемых условий наблюдения за результатами вредных воздействий, усугубляют еще неопределенности в формулировках, относящиеся к употреблению термина «здоровье», количественных критериев которого не существует. Кроме того, значения ПДК не несут информации о влиянии загрязнений на другие объекты и их трансформациях в биосфере. Однако они имеют значение при решении организационных проблем охраны окружающей среды.

В то же время Федеральным законом [40] N 7 – ФЗ (ст. 21 п. 1) предусмотрено, что нормативы качества окружающей среды, к которым по ст. 21 п. 2 относятся ПДК, «...устанавливаются для оценки состояния окружающей среды в целях сохранения естественных экологических систем, генетического фонда растений, животных и других организмов». В соответствии с этим положением нормативы ПДК когда-то уже должны быть преобразованы в критерии для биомониторинга окружающей среды. Пока же гигиенические нормативы ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест РФ разрабатываются в соответствии с Федеральным законом N 52 - ФЗ 1999 г. [45] и Положением о государственном санитарно-эпидемиологическом нормировании 2000 г. [46]. Разработанные нормативы ПДК после утверждения Главным государственным санитарным врачом РФ становятся обязательными для использования на всей территории РФ. Действующие на сегодня нормативы ГН 2.1.6.1338-03 с дополнениями и изменениями [47] распространяются на атмосферный воздух городских и сельских поселений, и используются при проектировании технологических процессов, оборудования и вентиляции, для санитарной охраны атмосферного воздуха, для профилактики неблагоприятного воздействия загрязняющих атмосферный воздух веществ на здоровье населения. Нормативы устанавливают предельно допустимое содержание в атмосферном воздухе населенных мест для 656 загрязняющих вредных веществ. В последнее время список скорректирован в сфере практики госуправления и статотчетности. В соответствии с [48], государственному учету и нормированию подлежат источники выброса только тех веществ, которые также подлежат государственному учету и нормированию. Они указаны в перечне вредных (загрязняющих) веществ цитируемого приказа Минприроды №579. Список содержит 115 индивидуальных веществ и соединений, из них 92 – радиоактивных. Список утвержден на 10 лет и должен пересматриваться в течение 1 года после вступления в силу международных обязательств РФ в области охраны окружающей среды, требующих принятия мер государственного регулирования в отношении загрязняющих веществ,

отсутствующих в Перечне загрязняющих веществ, если иное не предусмотрено международным договором, или по результатам научных исследований в области охраны окружающей среды, проведенных в установленном законодательством порядке. Можно отметить, что в соответствии с международной терминологией, в список загрязнителей уже включены твердые частицы классов $PM_{2.5}$ и PM_{10} .

Вместе с тем более 500 веществ по ГН 2.1.6.1338-03, не включенные в перечень, так же включаются в материалы инвентаризации выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух и их источников (в отношении действующих объектов хозяйственной и иной деятельности) и в состав проектной документации (в отношении вводимых в эксплуатацию новых и (или) реконструированных объектов хозяйственной и иной деятельности), в материалы по установлению нормативов предельно допустимых выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух и выдаче разрешений на выбросы вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух.

Таким образом, нормативы РФ в определенной мере учитывают и международный опыт, однако к настоящему времени это беспрецедентно широкая из существующих система нормирования качества воздушной среды. Многие страны не имеют таких систем, а в тех странах, где они есть, количество нормативов много меньше.

Национальные стандарты качества атмосферного воздуха (National Ambient Air Quality Standards, NAAQS) США, разработанные Агентством по защите окружающей среды (USEPA) в связи с поправкой 1990 г. к закону о чистом воздухе (The Clean Air Act, CAA) регламентируют 6 загрязнителей. CAA определяет два типа стандартов качества воздуха. Первичные стандарты призваны обеспечить защиту здоровья населения, в том числе «чувствительных» групп, таких как астматиков, детей и пожилых людей. Вторичные стандарты призваны обеспечить защиту общественного благосостояния (благополучия), включая защиту от ухудшения видимости, повреждения животных и сельскохозяйственных культур, растительности, зданий и сооружений. EPA разработало соответствующие стандарты для шести загрязняющих веществ, которые названы ими «основными» и «критериальными». Это оксид углерода CO (фед. реестр 76 FR 54294, утв. 31.08.2011), свинец Pb (фед. реестр 73 FR 66964, утв. 12.11.2008), азота диоксид NO_2 (фед. реестры 75 FR 6474, утв. 09.02.2010; 61 FR 52852, утв. 08.10.1996); озон O_3 (фед. реестр 73 FR 16436, утв. 27.03.2008); частицы $PM_{2.5}$, PM_{10} (утв. 14.12.2012); серы диоксид SO_2 (фед. реестры 75 FR 35520, утв. 22.06.2010; 38 FR 25678, утв. 14.09.1973).

Европейское законодательство и политика охраны воздушной среды в качестве одной из целей ставят достижение «уровня качества воздуха, которые не дают поднять до значимых негативные воздействия и риски для здоровья человека и окружающей среды».

В отношении контроля выбросов загрязняющих веществ, в Директиве ЕС, 2001, о Национальных потолочных значениях выбросов (National Emissions Ceilings Directive, NEC Directive, 2001) [49] и Гетеборгского протокола о борьбе с подкислением, эвтрофикацией и приземным озоном к конвенции ЕЭК ООН о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния 1979 г. [50] устанавливаются предельные значения выбросов диоксида серы, оксидов азота, неметановых летучих органических соединений и аммиака. Дополнения Гетеборгского протокола включают в себя также новые обязательства по сокращению первичной эмиссии $PM_{2,5}$, включая сажу.

Вместе с NEC Directive, 2001, Директивы качества воздуха (the Air Quality Directives 2008/50/EC) [51] и по тяжелым металлам (to Heavy Metals Directive 2004/107/EC) [52], охватывающие концентрации загрязнителей воздуха, составляют правовые рамки для регулирования качества воздуха в ЕС. Директива 2008/50/EC регулирует содержание диоксида серы (SO_2), оксидов азота (NO_x) включая диоксид азота (NO_2), твердых частиц (PM_{10} и $PM_{2,5}$), озона (O_3), свинца (Pb), бензола (C_6H_6) и оксида углерода (CO). Директива 2004/107/EC регулирует содержание тяжелых металлов – мышьяка (arsenic) As, кадмия (cadmium) Cd, ртути (mercury) Hg, никеля (nickel) Ni, а также полициклических ароматических углеводородов – ПАУ (polycyclic aromatic hydrocarbons – PAH), в т.ч. бенз(а)пирена (benzo(a)pyrene B(a)P).

Директивы по качеству воздуха устанавливают серию стандартов для оценки качества воздуха. Это стандарты концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, которые государства-члены не должны превышать. Существуют пять видов стандартов для защиты здоровья человека: предельные значения (Limit values) максимальных концентраций индивидуальных загрязнителей, их целевые значения (Target values), долгосрочная задача (Long-term objective), информационный порог (Information threshold) и порог оповещения (Alert threshold).

Директивами ЕС сложным образом регламентируется установление государствами-членами ЕС зон и агломераций для оценок и управления качеством воздуха на своих территориях по этим 5 стандартам (в кн.: Проектирование аппаратов пылегазоочистки, 2-е изд., в печ.). Директивы также предписывают порядок документального производства при управлении качеством воздуха. Государства-члены ЕС должны поддерживать уровни загрязнителей в воздухе ниже максимальных значений, определенных стандартами. Там, где превышены целевые значения максимумов, государства должны принять меры по сокращению загрязнения. Директивы определяют также, в каком виде информация должна быть доведена до общественности и предоставлена в Еврокомиссию.

Очевидно, одна из причин небольшого числа контролируемых загрязнителей в США и ЕС заключается в том, что число выбрасываемых в атмосферу токсичных веществ исчисляется сотнями тысяч наименований, и российская система контроля охватывает не более 1% из них. Однако из-за широты охвата из существующих систем нормирования загрязнения воздушной среды наиболее простой в применении представляется отечественная.

По состоянию на сегодня в ЕС остаются существенные превышения в отношении стандартов для защиты здоровья человека PM_{10} , NO_2 и O_3 , а в некоторых частях Европы это также справедливо для бенз(а)пирена. Есть и оптимистичная информация: стандарты по CO , SO_2 и бензолу в целом выполняются. В целом же функционирование отечественной, западноевропейской и американской систем приблизительно равнозначно. Вдобавок к одностороннему характеру действия, изначально допускающему нормирование только ухудшения качества атмосферы, а не оптимизацию отношения человеческого сообщества к природе, что необходимо для его устойчиво длительного развития, их общий недостаток также в том, что нормирование пока не затрагивает загрязнителей глобального действия типа ПГ (и среди них – SF_6), содержащихся в дымовых газах и вентиляционных выбросах ТЭС.

1.2.2 Методы определения ПДВ источников выброса дымовых газов и других источников производственных выбросов ТЭС

Для каждого производственного источника и объекта в целом ПДВ устанавливают в соответствии с нормативными документами [53] так, чтобы выбросы вредных веществ от него и от совокупности источников с учетом перспективы развития и рассеивания вредных веществ в атмосфере не создавали приземную концентрацию, превышающую ПДК этих веществ для населения, растительного и животного мира.

В фундаменте разработки проекта ПДВ находится теория обоснования ПДК, а в дальнейшем могут быть приняты более приемлемые по биоэтическим принципам показатели. Теоретическая концепция определения величины ПДВ основана на теории атмосферной диффузии примесей. Проблемы изучения процессов рассеивания примесей в атмосфере широко известны. Они достаточно полно систематизированы в [54]. Ввиду сложности реального процесса рассеивания возможны теоретические расчеты существенно упрощенных моделей. Дисперсные частицы в потоке создают возмущения, учет которых принципиально проблематичен. Поэтому рассматривают обычно модели гомогенных примесей. Уравнение распределения концентраций $C_i = m_i/V$ i -го ингредиента массой m_i в движущейся

многокомпонентной однофазной системе объемом V следует из уравнения массообмена $dm_i/d\tau = DV^2m_i$:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial C_i}{\partial x} + u_y \frac{\partial C_i}{\partial y} + u_z \frac{\partial C_i}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \right), \quad (1.5)$$

где u_x, u_y, u_z – составляющие вектора действительной (мгновенной) скорости потока.

Распространение выброса в атмосфере имеет турбулентный характер, в виду чего мгновенная скорость потока принципиально неопределима. Поэтому турбулентный массоперенос поддается математическому описанию после ряда существенных упрощений. Исходное упрощение было предложено О. Рейнольдсом в 1895 г.: считать скорость движения рассматриваемого объекта в потоке равной сумме осредненной во времени и пульсационной скоростей [55]:

$$u_x = u_{mx} + u'_x; u_y = u_{my} + u'_y; u_z = u_{mz} + u'_z, \quad (1.6)$$

где u_{mx}, u_{my}, u_{mz} – проекции осредненной во времени скорости; u'_x, u'_y, u'_z – проекции пульсационных добавок, т.е. отклонений мгновенной действительной скорости от осредненной во времени.

Подстановкой (1.6) в (1.5) получают математическое описание предложенной О. Рейнольдсом схемы турбулентного движения применительно к многокомпонентному потоку:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + (u_{mx} + u'_x) \frac{\partial C_i}{\partial x} + (u_{my} + u'_y) \frac{\partial C_i}{\partial y} + (u_{mz} + u'_z) \frac{\partial C_i}{\partial z} = -DV^2C_i \quad (1.7)$$

Она проще реального процесса. Унитарный турбулентный поток математическому описанию не поддается. В схеме отдельно рассматриваются трубки тока, движущиеся наподобие ламинарных струй, и пульсации, проникающие из одной трубки тока в другую. Перенос ингредиентов между ними происходит только с пульсациями, аналогично модели ламинарного движения многокомпонентного потока, когда перенос массы с одной линии тока на другую предполагается за счет броуновского движения (скачков) отдельных молекул. В модели турбулентного переноса переносчиками вещества служат не микроскопические объемы газа, занимаемые молекулами и выражаемые математически бесконечно малыми величинами, а моли – макроскопические области потока, отрываемые от линий тока энергией турбулентных вихрей.

Введенные упрощения еще не позволяют решать задачу рассеивания примеси в атмосфере. Дальнейшие допущения по характеру гидродинамических проблем могут быть условно разделены на общие и конкретные, касающиеся перемещения потоков в атмосфере

Земли. Принципиальной проблемой общего характера является невозможность определения величин мгновенных пульсаций. Математическое описание турбулентности (1.7) показывает картину движения, но еще не пригодно для расчетов. Зависимостей для количественной оценки действительных значений u'_x , u'_y , u'_z и связанных с ними пульсаций концентраций в каждой точке потока в любой момент времени нет, нет и способов их непосредственного измерения. Это мгновенные значения стохастических величин, а результат измерения всегда относится к временному отрезку конечной величины. Необходимы дополнительные соотношения, связывающие турбулентный перенос и распределения концентрации i -го компонента с осредненными по времени пульсациями, и определяющие величины таких пульсаций. Их вводят, после того или иного обоснования, как функции каких-либо легко измеримых параметров потока. Анализ способов подбора соответствующих уравнений будет приведен в разд. 2.2.

Одной из принципиальных проблем конкретного характера является определение величины начального подъема выброса ΔH над устьем трубы высотой H . Реальная картина распространения загрязнений показывает, что выбрасываемая струя разворачивается горизонтально на некоторой высоте

$$H_e = H + \Delta H, \quad (1.8)$$

которую называют эффективной. Значения ΔH и H_e зависят от начальной скорости и температуры выброса, скорости ветра и др. внешних параметров. В литературе отсутствует четкое количественное представление понятий начального подъема или эффективной высоты выброса. Практикуемая замена реального выброса факелом фиктивного источника с высотой H_e не привносит ясности, т.к. обоснованные параметры для ее идентификации (например, максимум высоты, концентрации в факеле или какие-либо другие характеристики) отсутствуют.

М.Е. Берлянд [54] по результатам численных расчетов на основании сравнения приземных концентраций от модельного источника с фиксированной высотой выброса и обычных источников предложил приближенное соотношение:

$$\Delta H = \frac{0,75w_0D_0}{u} \cdot \left(2,5 + \frac{1,65gD_0\Delta T}{Tu^2} \right), \quad (1.9)$$

где w_0 – скорость истечения, м/с; u – скорость ветра, м/с; D_0 – диаметр устья трубы, м; $T = T_0 - T_{ar}$ – разность между температурой выброса на выходе из трубы и летней температурой атмосферного воздуха, К.

С увеличением скорости ветра факел прижимается к земле (по (1.9) H_e уменьшается), что способствует возрастанию концентраций на ее поверхности, но факел выброса

разбавляется, что приводит к уменьшению концентраций. При определенной – «опасной» скорости ветра u_M приземная концентрация C_M будет максимальна. ПДВ источника назначают таким, чтобы максимальная приземная концентрация не превышала ПДК_{мр} при «опасной» скорости ветра u_M .

Численное решение авторами [53] упрощенного уравнения (1.7) с осреднением по масштабу турбулентности, соответствующему соотношению Прандтля (см. далее раздел 2.2), привело в свое время к нормативному уравнению для определения максимальной приземной концентрации при неблагоприятных метеорологических условиях:

$$C_M = \frac{AMFmn\dot{\eta}}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V\Delta T}}, \quad (1.10)$$

где A – параметр, зависящий от принятого вида профиля скорости ветрового потока (логарифмический, параболический или др.), перепада температуры в рассматриваемых слоях, климатических и сезонных характеристик, влияющих на перенос загрязнителя в атмосфере; M – интенсивность источника выброса, кг/с; V – объемный расход газовой смеси, м³/с; F – безразмерный множитель, учитывающий оседание загрязнителя в атмосфере; $\dot{\eta}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа; m и n – безразмерные коэффициенты.

Значения A для различных регионов РФ находятся в пределах 120-200 К^{1/3}·с^{2/3} мг/кг. Значение F для гомогенных выбросов принимается равным 1, а для гетерогенных выбросов выбирается по скорости седиментации загрязнителей и степени очистки. Значение $\dot{\eta}=1$ для местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км. Значения m и n зависят от параметров

$$V_M = 0,65 \sqrt{\frac{V\Delta T}{H}} \text{ м/с}, \quad (1.11)$$

$$f = 1000 \frac{w_0^2 D_0}{H^2 \cdot \Delta T} \text{ м/(с}^2\text{К)}, \quad (1.12)$$

характеризующих условия попадания загрязнителя в атмосферу: объем V м/с, перегрев ΔT К, начальную скорость w_0 м/с выбросов, высоту H м, диаметр D_0 м источника.

Если известны интенсивность источника загрязнения и условия выброса, то по формуле (1.10) можно рассчитать необходимую высоту выброса H . Приняв, что максимальная приземная концентрация не должна превосходить максимально разовой предельно допустимой концентрации, т.е. $C_M \leq \text{ПДК}_{\text{мр}}$, получим:

$$H = \sqrt{\frac{AMFmn\dot{\eta}}{ПДК_{\text{мр}} \cdot \sqrt[3]{V\Delta T}}} \quad (1.13)$$

Поскольку значения коэффициентов m и n зависят от H , задача решается путем последовательных приближений с подбором значений H .

На основании (1.10) или (1.9) вычисляется и величина предельно допустимого выброса ПДВ, который приравнивается интенсивности источника выброса M :

$$ПДВ = \frac{H^2 ПДК_{\text{мр}} \cdot \sqrt[3]{V\Delta T}}{AFmn\dot{\eta}} \quad (1.14)$$

Проведенный анализ теоретической базы существующих методов расчета ПДВ показывает возможность уточнения расчетных соотношений на базе современных программ, реализующих методы вычислительной гидроаэродинамики. Они позволяют проводить расчеты на основе более гибких модельных соотношений для интенсивности турбулентного переноса, чем на основе коэффициентов турбулентной вязкости по модели Прандтля (краткий анализ некоторых современных моделей см. в разд. 2.2). С теоретической и практической точки зрения прежде всего необходимо уточнение величины начального подъема примеси ΔH и эффективной высоты выброса H_e посредством численного моделирования с использованием методов *CFD*.

1.3 Теоретическая база существующих методов проектирования основных типов устройств очистки выбросов ТЭС

1.3.1 Выбор исходных параметров для проектирования. Упрощения характеристик выбросов, приемлемые для продуктов сгорания газообразного и твердого топлива на ТЭС

Загрязнители земной атмосферы могут пребывать в плазменном, газообразном, жидком и твердом агрегатных состояниях. В нижних слоях атмосферы человек контактирует в основном с газообразными и измельченными конденсированными (жидкими и твердыми) загрязнителями. Как гомогенные, так и гетерогенные выбросы производственных помещений, подлежащие очистке, а также выбросы, поступающие на обработку в аппараты систем очистки выбросов, имеют, как правило, сложный состав. Способ обработки и эффективность очистки выбросов зависят от свойств входящих в них ингредиентов, которые, в принципе, однозначно задаются полным набором физико-химических характеристик. Однако полный учет процессов, идущих в смеси даже нескольких веществ, невозможен. Поэтому обычно останавливаются на наиболее характерном для данных условий процессе и описывают его упрощенной

математической моделью. Из загрязнителей принимаются во внимание только основные по токсичности или количеству, а для инертной части берут усредненные характеристики ее компонентов. Например, дисперсные выбросы с небольшим содержанием взвешенных частиц, такие как продукты сгорания газового, жидкого и малозольных сортов твердого топлива, или воздух с невысокой запыленностью, рассматривают как гомогенные. Если же наличие взвеси существенно влияет на свойства выбросов, то дисперсную и гомогенную части аэрозоля рассматривают как независимые системы. Обычно гомогенную часть отождествляют с моделью идеального газа, а свойства дисперсной части описывают на основе математических моделей нормального (НР) или логарифмически нормального распределения (ЛНР) частиц по размерам. Для большинства обычных гомогенных выбросов, таких как дымовые газы теплоиспользующих установок и многие вентиляционные выбросы производственных объектов, используется модель идеальной газовой смеси, без учета фазовых превращений или химических взаимодействий ингредиентов.

Химические составы выбросов промышленных зон и выбросов реальных производственных процессов изучены слабо. Опыт обследования территориально-производственных комплексов, в состав которых всегда входили собственные крупные теплоисточники, показал, что обычно каждое производство на предприятии и предприятие в промышленной зоне образуют собственный ареал загрязнения со свойственными только ему загрязнителями ([56]). Вместе с тем по характерным загрязнителям, таким как CO, NO_x, CO₂ и др. – образуется сложный многокомпонентный ареал, в котором часто возникают резкие повышения концентраций отдельных ингредиентов. Процесс имеет стохастический характер, однако уровень фоновых загрязнений воздуха промышленных зон в среднем более чем на порядок превышает загрязнение городского воздуха и продолжает увеличиваться.

Ввиду отсутствия необходимых данных о параметрах фоновых загрязнений свойства нейтральной части выброса обычно рассчитывают по чистому воздуху или по продуктам сгорания с ним топлива. Свойства смеси загрязнителей чаще всего находят по принципу аддитивности, складывая величины соответствующих параметров ингредиентов пропорционально их содержанию. Для условий, где он заведомо неприменим (при интенсивных фазовых и химических превращениях, высоком содержании взвешенных частиц), свойства смесей можно установить только эмпирически.

Для гетерогенных смесей сложного состава используют понятие «реального газа», объединяющее в себе некомпактные состояния вещества с различной степенью агрегированности молекул. В него могут включать состояния перегретого пара (идеального газа), насыщенного сухого пара, влажного пара (конденсационного аэрозоля), пара над

конденсированным веществом. Совокупности параметров состояния индивидуального вещества или смеси веществ образуют поверхности состояний со своими характерными формами и некоторыми границами. В ряде случаев они могут быть представлены математически. Поверхности состояний индивидуального вещества в газовой, жидкой и твердой фазах в координатах: давление p , Па – температура T , К – удельный объем v , м³/кг, представлены на рис. 1.8.

Параметры твердого состояния индивидуального вещества находятся в пределах поверхности S_i . Одна из ее границ – линия плавления E_iD_i , другая – линия сублимации (возгонки) F_iE_i . Кривая сублимации одновременно представляет значения давления пара над твердым веществом в состоянии равновесия. Параметры равновесия трех фаз расположены на прямой $E_iA_iB_i$, перпендикулярной координатной плоскости p, T . В области S_i+G_i , ограниченной упомянутыми линиями F_iE_i , $E_iA_iB_i$ и линией сухого насыщенного пара B_iK_i , параметры состояния не соответствуют условиям компактного пребывания вещества. Оно возгоняется, т.е. диспергируется на элементы с разной степенью агрегированности от ультрадисперсных частиц и кластеров до пара из наночастиц, молекул и атомов.

С увеличением удельного объема v степень агрегированности снижается, а доля паровой фазы растет, достигая 100% при параметрах линии B_iK_i . Это состояние сухого насыщенного пара, а правее B_iK_i располагается область G_i перегретого пара (газа). При возгонке индивидуального вещества параметры p, T не меняются (процесс изобарно-изотермический), вследствие чего поверхность десолидации (возгонки) S_i+G_i ориентирована по нормали к координатной плоскости p, T . В области параметров этой поверхности образуется аэрозольная система, в которой крупные элементы распада компактного твердого вещества (частицы и кластеры размерами от 10^{-8} м) находятся во взвешенном состоянии среди мельчайших – отдельных атомов, молекул и мелких кластеров (наночастиц) из нескольких молекул.

В состоянии твердого аэрозоля (с параметрами поверхности S_i+G_i) вещество может также перейти из области газа G_i через линию B_iK_i в результате уменьшения удельного объема v (уплотнения) перегретого пара при низких температурах и давлениях. В эту область вещество может еще перейти из других своих состояний. Наиболее очевиден переход через часть A_iB_i линии трехфазного равновесия $E_iA_iB_i$ из области влажного пара (жидкого аэрозоля) L_i+G_i при его охлаждении и (или) расширении. Подобные явления часто наблюдаются в земной атмосфере. В состоянии твердого аэрозоля может оказаться плавящееся (тающее) вещество, перейдя из области плавления S_i+L_i через другую часть линии трехфазного равновесия $E_iA_iB_i$ – линию E_iA_i , если его давление, температура и плотность уменьшатся. В частности, непосредственно через тройную точку A_i вещество может подобным образом перейти в

состояние S_i+G_i из области компактной жидкости L_i . Такие переходы заметны в процессах, связанных с плавлением металлов и шлаков, например, при образовании сварочного аэрозоля или сжигании пылевидного топлива высокотемпературных сортов.

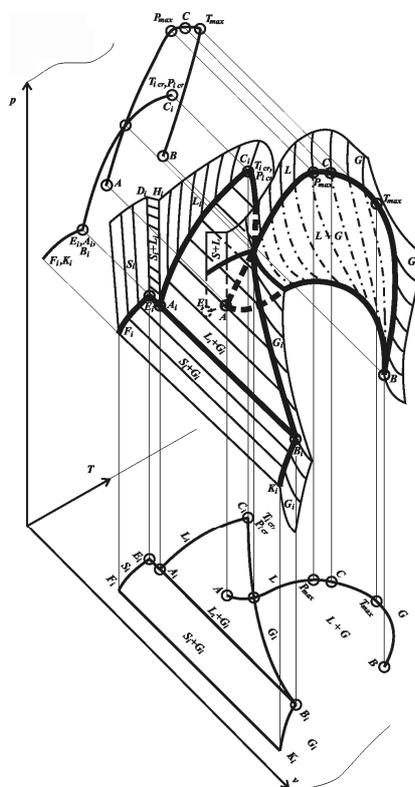


Рис. 1.8 Термодинамические поверхности состояний индивидуального вещества и смеси

Для компактной жидкости характерен переход в дисперсное состояние через пограничную линию $A_i C_i$. В аэрозольной системе с параметрами поверхности L_i+G_i – в области влажного пара, жидкие ультрадисперсные частицы и кластеры взвешены среди пара вещества. Их испарение и переход в область перегретого пара G_i аналогичны десолидации в области S_i+G_i . Параметры области влажного пара изучены достаточно подробно. Вещество может перейти в область L_i+G_i из всех соседствующих состояний через ограничивающие кривые – кипением из области L_i через $A_i C_i$, конденсацией из области G_i через $B_i C_i$. Переход из области S_i+G_i через линию трехфазного равновесия $A_i B_i$ традиционного специфичного термина не имеет. По физической сути это процесс плавления (таяния) твердых частиц аэрозоля.

Аэрозоли, образовавшиеся при переходе конденсированных или газообразных состояний в области S_i+G_i и (или) L_i+G_i при соответствующем изменении параметров состояний, называют конденсационными. К этому же классу (типу) относят и аэрозоли, образующиеся как продукты газофазных реакций. Пример такого типа аэрозоля – дымовые газы, содержащие мелкодисперсную ($\delta < 1$ мкм, т. наз. «газовую») сажу, которая образуется при сжигании

углеводородного топлива с большим недостатком кислорода. при перемещении по трубопроводам, очистным устройствам и в атмосфере параметры конденсационных аэрозолей могут изменяться. В общем случае для описания аэрозольных систем наряду с аэродинамическими закономерностями необходимы химические и термодинамические. Аэрозоли, образующиеся при диспергации компактных твердых материалов – дисперсионные аэрозоли, чаще всего не изменяют в окружающих условиях своих термодинамических и химических свойств.

Реальные аэрозольные загрязнители являются многокомпонентными. Поверхности их состояний поддаются графическому представлению лишь в случае, когда все ингредиенты аэрозоля – вещества с близкими физико-химическими свойствами, при этом существенно отличаясь от поверхностей состояний индивидуальных веществ. Область влажного пара такой смеси (рис. 1.8, фигура справа, область $L+G$) представляет собой сложную поверхность высокого порядка. Она не ориентирована по нормали ни к одной из координатных плоскостей – переход многокомпонентной системы из жидкого состояния в газообразное не происходит при двух постоянных параметрах. Область многокомпонентного влажного пара отличается и тем, что критической точке C не соответствуют максимумы температур и давлений. Криконденбара – точка максимального давления P_{max} , расположена на линии кипения многокомпонентной жидкости AC , а крикондентерма – точка максимальной температуры T_{max} , – на линии насыщения многокомпонентного пара BC . Поэтому при взаимной растворимости ингредиентов аэрозоля в области влажного пара возможны жидкие состояния веществ с закритическими температурами и парообразные с закритическими давлениями, а также явления обратного испарения и обратной конденсации. Результаты термодинамических расчетов таких систем приближительны.

Для упрощения расчетов свойства гомогенных выбросов по возможности отождествляют со свойствами идеального газа. Тогда их состояния характеризуют термодинамическими параметрами p , T и v (или плотностью $\rho=1/v$, кг/м³). Иногда используют функции состояния – изменения внутренней энергии Δu , энтальпии Δi , свободной энергии (потенциала Гельмгольца) ΔF , свободной энтальпии (потенциала Гиббса) ΔG , и их удельными величинами с единицей измерения Дж/кг. Важнейший среди последних – химический потенциал ψ , определяемый как изобарно-изотермический потенциал (потенциал Гиббса), отнесенный к единице массы вещества m , кг:

$$\psi = -G/m = -(U - TS + pV)/m . \quad (1.15)$$

Он имеет смысл полезной работы, которую может произвести 1 кг вещества в изобарно-изотермическом процессе.

Характеристики гомогенной смеси могут быть определены однозначно, если только она равновесна, т.е. в любой части ее свойства неизменны и одинаковы. Хотя реальные выбросы всегда бывают неравновесными, для гомогенных чаще всего возможно применение модели идеальной равновесной газовой смеси. У гетерогенных выбросов эта модель используется для представления свойств газовой части, а взвешенные частицы характеризуются концентрацией и дисперсностью. Обычно для частиц реальных аэрозолей принимается логарифмически нормальное распределение (ЛНР) размеров, которое однозначно задается двумя параметрами –

логарифмами среднего диаметра $\lg D_m = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \lg D_i}{\sum_{i=1}^N n_i}$ и стандартного отклонения от него

$\lg \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N n_i (\lg D_m - \lg D_i)^2}{\left(\sum_{i=1}^N n_i - 1\right)}}$. График ЛНР размеров частиц описывается

выражением

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma} \int_{-\infty}^{\lg D} \exp\left[-\frac{(\lg D - \lg D_i)^2}{2 \lg^2 \sigma}\right] d(\lg D). \quad (1.16)$$

Оно нормировано, т.е. множители перед интегралом подобраны так, чтобы результат не мог быть больше единицы, и в таком виде тождественно интегралу вероятностей. Значения этого интеграла протабулированы и приводятся во многих изданиях (напр., в [57, 58, 59]), что удобно для вычисления характеристик взвешенных частиц.

1.3.2 Определение эффективности золоулавливающих и газоочистных аппаратов

Воздух, использованный в производственном цикле (например, для сжигания топлива или разбавления вредных, выделяемых технологическими устройствами), вследствие необратимости реальных процессов невозможно восстановить в исходном качестве, обрабатывая его каким бы то ни было образом. Поэтому очистные сооружения в состоянии лишь понизить уровень загрязнения. Совершенство очистного оборудования определяется отношением достигаемого уровня обезвреживания выброса и приемлемого уровня загрязнения им окружающей среды. Объективным параметром загрязнения могла бы служить характеристика темпа естественного изменения качества атмосферы – параметр изменчивости R :

$$R = \partial C / (C_b \partial \tau), \quad (1.17)$$

где C_b и τ – начальная концентрация вещества и время наблюдения за ее изменением.

Однако пока достоверно определены параметры изменчивости только некоторых ингредиентов атмосферы.

Приемлемый уровень загрязнения может быть объективно оценен только на базе биомониторинга. Нарботанная на настоящее время база комплексных биологических, метеорологических, гигиенических, инженерных исследований еще слаба, чтобы давать на ее основе реальную оценку состояния атмосферы. Очевидно, это технология будущего, а пока в России оценка эффективности работы очистных устройств может ориентироваться только на имеющие юридическую силу нормативы загрязнения в виде ПДК. Непосредственная оценка по ПДК легко осуществима, однако экологически мало информативна. Но не это препятствует распространению метода оценки эффективности очистки посредством сравнения достигаемого уровня обезвреживания с ПДК. Современные методы обработки выбросов позволяют улавливать загрязнители при приемлемых затратах на 95% и более, а концентрации вредных примесей еще превышают нормативы ПДК на 4...5 и более порядков. Снижение концентраций до уровня, сопоставимого с ПДК, обошлось бы слишком дорого. По этой причине уровень обезвреживания выбросов устанавливается из экономических соображений, а не по экологическим или санитарно-гигиеническим требованиям. В экономически допустимых пределах совершенство современных газоочистных устройств оценивается по степени (коэффициенту) очистки:

$$\eta_{tot} = \frac{M_b - M_e}{M_b} \cdot 100\% = \frac{W_b C_b - W_e C_e}{W_b C_b} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{W_e C_e}{W_b C_b}\right) \cdot 100\%, \quad (1.18)$$

где M_b , C_b , W_b – масса, средняя концентрация загрязнителя и расход газовых выбросов до очистки; M_e , C_e , W_e – то же, после очистки.

В процессах газоочистки начальная концентрация загрязнителя, как правило, ниже 5% об., и с достаточной для практических расчетов точностью можно принять $W_b = W_e$; тогда

$$\eta_{tot} = \left(1 - \frac{C_e}{C_b}\right) \cdot 100\%. \quad (1.19)$$

При последовательной обработке отбросных газов в нескольких аппаратах

$$\eta_{tot} = 100 - \prod_{i=1}^N \varepsilon_i \%, \quad (1.20)$$

где $\varepsilon_i = 100 - \eta_i$ – коэффициент проскока загрязнителя через i -й аппарат; η_i – коэффициент очистки в i -м аппарате; N – количество аппаратов.

Соотношения 1.18, 1.19, 1.20 справедливы для выбросов с одним гомогенным загрязнителем или с монофракционной взвесью, при обработке которых не образуется новых токсичных соединений. Для полидисперсных или многокомпонентных смесей формулы применимы при одинаковой степени очистки всех загрязнителей. Однако на практике приходится иметь дело с селективностью очистных устройств по ингредиентам.

Возможность использования того или иного типа устройства для обезвреживания выбросов определенного состава устанавливается по полному коэффициенту очистки, для подсчета которого необходимы данные о селективных коэффициентах очистки рассматриваемого аппарата. Селективную способность пылезолоосадительных устройств характеризуют фракционными η_F и парциальными η_P коэффициентами очистки:

$$\eta_F = \frac{\Delta M_i}{M_{ib}} \cdot 100\% = \frac{(M_b - M_e) \Delta F_i}{F_{ib} M_b} \cdot 100\% = \frac{\Delta F_i}{F_{ib}} \eta_{tot} \% , \quad (1.21)$$

$$\eta_P = (\Delta P_i / P_{ib}) \eta_{tot} \% , \quad (1.22)$$

где F_{ib} , ΔF_i – доля частиц i -й фракции, а P_{ib} , P_i – доля частиц i -го размера в составе исходного и уловленного загрязнителя; M_{ib} , ΔM_i – количество исходного и уловленного вещества i -й фракции; $(M_b - M_e)$ – количество уловленного вещества всех фракций.

Состав гомогенных загрязнителей в отличие от дисперсных удобнее относить ко всему количеству отбросных газов. Поэтому селективные (парциальные) коэффициенты очистки η_C гомогенных выбросов представляются в виде:

$$\eta_C = \frac{\Delta M_i}{M_{ib}} \cdot 100\% = \frac{W_b C_{ib} - W_e C_{ie}}{W_b C_{ib}} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{W_e C_{ie}}{W_b C_{ib}} \right) \cdot 100\% . \quad (1.23)$$

Если расход выбросов до и после очистного устройства можно принять одинаковым, то

$$\eta_C = (1 - C_{ie} / C_{ib}) \cdot 100\% . \quad (1.24)$$

Здесь M_{ib} , M_i – исходное и уловленное количество i -го загрязнителя; C_{ib} , C_{ie} – исходная и конечная концентрации i -го загрязнителя в выбросах.

Формулы 1.21, 1.22, 1.23, 1.24 могут быть применены при наличии данных о количестве обезвреженного загрязнителя по ингредиентам. Достоверное теоретическое определение фракционных и парциальных долей улавливаемых ингредиентов невозможно, поскольку происходящие в очистных устройствах процессы, как правило, не поддаются математическому описанию. Поэтому в расчетах принимают эмпирические данные по сходным процессам. По

известному составу загрязнителей и фракционным или парциальным коэффициентам подсчитывают полные коэффициенты очистки η_{tot} :

$$\eta_{tot} = \sum_{i=1}^N \eta_{iF} F_{ib} \% ; \quad (1.25)$$

$$\eta_{tot} = \sum_{i=1}^N \eta_{iP} P_{ib} \% ; \quad (1.26)$$

$$\eta_{tot} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N \eta_{iC} C_{ib}}{\sum_{i=1}^N C_{ib}} \right) \cdot 100\% . \quad (1.27)$$

Для многих дисперсных материалов функции $\eta_{F(P)} = f(D)$ и $F_{ib}(P_{ib}) = \varphi(D)$ с той или иной погрешностью могут быть аппроксимированы прямыми (линейной зависимостью) в вероятностно-логарифмической системе координат $P - \lg D$, что означает возможность применения к ним закона нормального распределения случайных событий. Выражая $f(D)$ и $\varphi(D)$ через соответствующие соотношения параметров $\lg \sigma_p$, $\lg \sigma_q$, $\lg D_{50}$, $\lg D_m$, полный коэффициент очистки представляют в виде функции нормального распределения

$$\eta_{tot} = \Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (1.28)$$

параметры t и x которой определяются по соотношениям:

$$t = \lg \left(\frac{D_p}{D_m} \right) / \lg \sigma_p, \quad (1.29)$$

$$x = \lg \left(\frac{D_m}{D_{50}} \right) / \sqrt{\lg^2 \sigma_q + \lg^2 \sigma_p}, \quad (1.30)$$

где σ_q и D_{50} – соответственно дисперсия и диаметр частиц, осажденных в аппарате на 50%; σ_p и D_m – соответственно дисперсия и медианный диаметр частиц исходного дисперсного вещества.

Таким образом, применяемый способ подсчета полного коэффициента очистки основан на предположении о логарифмически нормальном распределении размеров частиц исходного полидисперсного материала, и фракционных коэффициентов их очистки в любых пылезолоосадителях. Это предположение весьма приблизительно соответствует опыту газоочистки и принято не в качестве теоретического обоснования расчетов степени очистки, а для удобства их выполнения, т.к. позволяет заранее табулировать значения функции нормального распределения $\Phi(x)$, %, по которым подсчитывают величины, принимаемые за коэффициенты очистки для соответствующих значений x , вычисляемых на основе отмеченного предположения как параметр осаждения.

Недостаточно разработана с теоретической и практической точки зрения проблема оценки совершенства способов обработки, связанных с химическими превращениями загрязнителей. Практикуемое в таких случаях формальное применение выражения (1.19) может привести к грубым ошибкам. Игнорирование конкретных свойств исходных реагентов и термодинамически возможного набора конечных продуктов может обернуться тяжелыми последствиями, поскольку зачастую продукты реакции не безвредны, а иногда более токсичны, чем исходные компоненты. Ошибки такого рода типичны при оценке метода термического обезвреживания. К примеру, даже при термообезвреживании чисто органических загрязнителей с молекулами из атомов С, Н и О они могут почти полностью окислиться до нетоксичных, но оказывающих глобальное парниковое воздействие CO_2 и H_2O . Вместе с тем в процессе горения образуются оксиды азота NO и NO_2 , которые могут быть менее токсичны, чем исходные соединения, но по воздействию на биосферу сравнимы с формальдегидом, акролеином, оксидами серы и др. соединениями, участвующими в образовании сульфатных и фотохимических смогов. Формальный расчет степени обезвреживания по исходным загрязнителям может показать картину глубокой очистки вредных выбросов, тогда как учет в формуле (1.19) образовавшихся оксидов азота поможет выявить реальную ситуацию. Если степень очистки выбросов окажется при этом недостаточной (например, при высоких концентрациях оксидов азота, что характерно для энергетических парогенераторов и высокотемпературных печей), то может возникнуть вопрос о двухступенчатой очистке и, следовательно, о дополнительных затратах средств. При таком варианте решения задачи полный коэффициент очистки может определяться по формуле (1.20), учитывающей результаты обеих ступеней обезвреживания.

Недопустимы оценки по начальным и конечным концентрациям исходных загрязнителей эффективности процесса термообработки соединений, содержащих металлы, фосфор, серу, галогены и др. элементы. Термообработку хлорсодержащих продуктов нетрудно организовать так, что исходных загрязнителей в продуктах сгорания не окажется. Следовательно, расчеты коэффициентов очистки по (1.19) обеспечат положительную оценку результатов обезвреживания. В то же время в продуктах сгорания неизбежно появятся новые виды загрязнителей: сравнительно малотоксичные, но обладающие высокой коррозионной активностью кислые соединения – хлороводород HCl и хлорные кислоты, высокотоксичные соединения типа Cl_2 , Cl_2O и др.; наконец, особо опасные соединения типа фосгена COCl_2 , относящиеся к группе боевых отравляющих веществ. Учет всей совокупности конечных продуктов очевидно покажет непригодность методов термообработки для обезвреживания подобных выбросов.

Проведенный анализ ([60]) показал, что метод оценки очистных устройств по коэффициентам очистки имеет малую экологическую или санитарно-гигиеническую ценность. Коэффициент очистки может служить показателем интенсивности процессов, протекающих в очистном устройстве. Показателей экологического или санитарно-гигиенического совершенства аппаратов обезвреживания в настоящее время нет.

Для правильной оценки соответствия очистных систем, улучшения условий их эксплуатации необходима разработка максимально простых показателей общего характера. Они должны обеспечивать объективность оценки технического, санитарно-гигиенического и эколого-энергетического совершенства средств обезвреживания по всем загрязнителям с учетом снижения выброса парниковых газов. Разработанные показатели должны содержать параметры, позволяющие легко и очевидно сопоставлять эффективность очистных устройств. Одним из таких показателей комплексного характера является величина энергозатрат на восстановление качества окружающей среды. Это связано с тем, что энергозатраты всех типов и классов очистных устройств возрастают с увеличением достигаемой степени очистки. К примеру, минимальное количество энергии, необходимое для конденсации единицы массы (1 кг) гомогенной примеси, численно равно работе процесса изотермического обратимого сжатия ее объема от парциального давления p до давления насыщения p_{dn} :

$$A = 2,303R \cdot T \cdot \lg(p_{dn}/p), \quad (1.31)$$

где A – работа сжатия, Дж/кг, R – газовая постоянная, Дж/(кг·К), T – абсолютная температура, К, смеси.

Отсюда соотношение затрат энергии A на компрессию примеси с концентрацией, сравнимой с ПДК, например, 10^{-4} % об. (10^{-6} об. долей) и с обычной для промышленных гомогенных загрязнителей концентрацией 10^{-1} % об. (10^{-3} об. долей), будет равно 2. Таким образом, энергетические затраты на удаление одинакового количества загрязнителя посредством конденсации логарифмически возрастают с понижением его концентрации. Аналогичная зависимость характерна и для сорбционных методов очистки, основой которых также является конденсация примесей.

Удельные затраты энергии на удаление дисперсных примесей возрастают пропорционально снижению концентрации взвешенных в потоке частиц, поскольку степень очистки в пылеулавливающих аппаратах практически не зависит от начальной концентрации загрязнителя. Затраты растут также и с уменьшением размеров частиц.

Методы термообработки характеризуются ростом затрат энергии с понижением начальных концентраций загрязнителей как на единицу обрабатываемой массы, так и на процесс в целом вследствие уменьшения скорости реакции окисления:

$$w = k A^{\alpha} B^{\beta}, \quad (1.32)$$

где α , β – стехиометрические коэффициенты уравнения реакции с исходными реагентами A и B ; w , k – скорость и константа скорости прямой реакции. Для обеспечения прежней степени завершенности при замедлении превращения веществ необходимо повысить температурный уровень процесса, компенсируя понижение концентрации увеличением константы скорости реакции, или интенсифицировать процесс за счет подвода механической энергии, повысив давление среды. Термохимические, термокаталитические, хемосорбционные и другие способы обработки, которые применяют в ряде случаев для очистки пылегазовых выбросов, являются комбинациями рассмотренных выше, и при их реализации идут процессы еще более сложного характера. Однако и для них принцип увеличения затрат энергии для обеспечения более глубокой очистки остается справедливым.

Таким образом, величина энергозатрат является наиболее универсальным параметром, однозначно характеризующим эффективность работы любого очистного устройства независимо от класса, к которому оно принадлежит, не только в смысле энергоэкономичности, но и по совершенству действия данной конструкции.

1.3.3 Анализ существующих методов расчетов инерционных золоуловителей

Очистка потоков аэрозолей от дисперсных загрязнителей производится в основном посредством их удаления, для чего используются отличия параметров взвешенных частиц от молекул газа. Названия одних способов удаления указывают на используемые различия (гравитационное и инерционное осаждение), а для других принято пользоваться техническими терминами. К примеру, «мокрая» очистка является одной из разновидностей инерционной очистки, но с осаждением на пленке частиц диспергированной жидкости. Без учета этой специфичности процесса, действие оросительных аппаратов от пористых фильтров по большому счету отличается только тем, что капли распыленной жидкости (препятствия) подвижны относительно стенок, а барботажных от циклонов – составным движением частиц аэрозоля во вращающемся потоке внутри поднимающегося во вспененной жидкости газового пузырька с поверхностью осаждения. Теория процессов «мокрой» очистки, в отличие от теории осаждения в циклонах и пористом слое, рассматривает и стадию захвата частиц поверхностью пленки – препятствия. Прохождение этой специфичной стадии зависит от способов диспергации потоков. По результатам проводимых опытных и численных исследований последних лет по ВКУ ([61, 62, 63, 64]), обнаруживается еще зависимость улавливания частиц на капле от ступеней ее образования. Это требует специфичных исследований закономерностей

диспергации компактной жидкости, ввиду чего мокрые методы очистки непосредственно не включались в круг задач данной работы. Вместе с тем полученные здесь результаты проверялись и по данным работ, посвященных исследованию систем мокрой очистки.

Инерционное осаждение базируется на различии масс молекул газовой среды и частиц аэрозоля, но в отличие от гравитационного здесь используются инерционные свойства вещества. В прямолинейных равномерно движущихся потоках средние скорости и направления движения молекул и частиц пыли мелкого и среднего размера (приблизительно до 30 мкм) близки, ввиду чего дисперсная часть обычной промышленной пыли неинтенсивно отделяется от газовой среды. Различия в массах молекул и частиц становятся определяющими для их сепарации при существенно неравномерном движении аэрозоля. В криволинейных каналах молекулы газа-носителя из-за незначительной инерционности создают линии тока, практически эквидистантные ограждениям каналов, а частицы аэрозвеси могут сходить по касательным на изгибах линий тока, сохраняя по инерции прежние направления движения. На практике инерционное осаждение реализуется, как правило, при циклонной (вихревой) сепарации или фильтрации на препятствиях.

Движение потока аэрозоля в циклонных сепараторах происходит по сложной трехмерной спиральной траектории и без упрощений не поддается математическому описанию [65]. Сейчас степень осаждения взвешенной части аэрозоля в них устанавливается опытным путем. Теоретические расчеты направлены на определение скоростей и давлений во вращающемся потоке аэрозоля, соответствующих приемлемым энергозатратам.

Эффективность отделения дисперсной части потока аэрозоля в циклоне зависит в основном от факторов, определяющих соотношение сил инерции и сопротивления: кривизны траектории, скорости и момента инерции частиц, вязкости потока. Эффективность увеличивается с ростом силы инерции, т.е. с ростом момента инерции и скорости частиц, и с уменьшением радиуса кривизны траектории. В данной работе рассматриваются сепараторы, создающие вращательное движение потока аэрозоля, и производящие очистку выбросов в основном за счет выделения взвешенных частиц вследствие инерционного осаждения, например, батарейные циклоны. При этом методы повышения эффективности осаждения взвеси имеют свою специфику. Возможность увеличения массы частиц, как правило, отсутствует. Поэтому основным способом совершенствования инерционных аппаратов с поступательным движением потока является увеличение его скорости. Если инерционный способ осуществляется в потоке с вращательным движением, то степень осаждения растет с созданием условий, увеличивающих момент инерции частицы, что сопровождается и ростом энергетических затрат на очистку. Создание расчетного способа определения эффективности

осаждения позволило бы определять оптимальные параметры очистных устройств на стадии их конструирования.

К настоящему времени предложено большое число различных типов осадителей, реализующих сепарацию взвеси во вращательных потоках. В рамках данной работы прежде всего рассматриваются вопросы, касающиеся серийных отечественных циклонных пылеосадителей, которые нашли широкое применение в процессах очистки производственных выбросов. При постановке задачи определения степени осаждения в циклонном сепараторе взвеси из многокомпонентного гетерогенного потока используют ряд общепринятых упрощений [66]. Не учитываются взаимодействия взвешенных в потоке частиц между собой, влияние броуновского движения молекул на частицы, фазовые превращения частиц в потоке, различия размеров и форм частиц, влияние частиц на объем и плотность потока. В результате рассматриваем движение взвешенной частицы с массой m_p , кг и скоростью \vec{W} , м/с, которое можно описать с помощью закона Ньютона

$$m_p d\vec{w} / d\tau = \vec{F}, \quad (1.33)$$

где \vec{F} – сила, Н, действующая на движущуюся в потоке частицу; τ – время, с.

Результирующая сила \vec{F} является равнодействующей множества сил, которые могут повлиять на перемещение частицы в потоке. В земных условиях их обязательными составляющими будут сила сопротивления потока, в котором движется частица, и сила тяжести. В общем случае, при неравномерном и непоступательном движении, к ним добавятся силы инерции, сопутствующие ускорению или замедлению движения, и силы, характерные для потоков с криволинейной траекторией: сила, возникающая из-за наличия радиального градиента давления, центробежная сила, сила Магнуса, подъемная сила, сила Кориолиса. В турбулентном потоке на взвешенные частицы могут оказать воздействие силы, возникающие за счет энергии турбулентных вихрей. Эпизодически могут также иметь место различного рода внешние силы, непосредственно не связанные с движением потока. Решить уравнение движения для общего случая, с учетом всех возможных сил, не удастся. Поэтому необходим анализ действующих сил с отсеиванием тех, которые представляются несущественными с точки зрения особенностей модели, используемой для поставленной задачи. При наличии не более двух сил возможно ее аналитическое решение с последующей корректировкой эмпирическими коэффициентами. Возможно также решение уравнения движения через безразмерные характеристики подобия. В пределах исследованных параметров процесса, для которых установлены их численные значения, оно является таким же строгим, как и аналитическое. При этом оно так же, как и аналитическое, откорректированное

эмпирическими коэффициентами, будет надежно давать верные результаты только в пределах условий, при которых проводились исследования.

Касательно задачи осаждения взвеси в сепараторах с вращательным движением потока принципиально возможен и другой путь – через оценку влияния силы сопротивления на процесс вывода частиц из потока, который на первый взгляд может показаться более предпочтительным. Однако для этого необходимо связать скорости частиц, которые после схода с линии тока перемещаются по сложной криволинейной траектории, с возникающими при этом силами сопротивления (возможно, с учетом вертикальной седиментации за счет гравитации – см. о движении частиц под действием сил сопротивления и тяжести, напр., в [57, 67]). Если даже удастся аналитически идентифицировать траекторию, найти характеристики движения по ней частиц и составить параметр, характеризующий их сепарацию, то его необходимо будет сопоставить с опытными данными о движении частиц по такой траектории, чтобы через эмпирические коэффициенты учесть радиальные перемещения, необходимые для вывода частиц из потока. Однако найти аналитически реальные параметры этой траектории проблематично. Возможность получения надежных опытных данных по требуемым характеристикам (средний радиус и центр кривизны траектории, тангенциальная и радиальная скорость частиц на ней, длина пробега и т.д.) такого специфического вида перемещения частиц также вызывает сомнения. В то же время при рассмотрении задачи об осаждении частиц в серийных циклонных сепараторах можно избежать отмеченных затруднений.

Основные параметры осаждения используемых на практике циклонов – диаметр отсекания D_{50} и дисперсия размеров улавливаемых частиц σ_p , являются весьма надежными опытными характеристиками, установленными посредством строгих испытаний по стандартным методикам на заводах – изготовителях. Основываясь на этих данных, можно рассматривать выделение частиц из потока как произошедший факт и исследовать процесс в целом. Такой подход позволяет использовать для характеристики движущейся системы принцип Остроградского – Гамильтона, который заключается в том, что для действительного начавшегося движения интеграл по времени функции Лагранжа (суммы кинетической и потенциальной энергии) принимает экстремальное значение. Таким образом, можно получить искомый обобщенный (безразмерный) параметр осаждения посредством сопоставления энергетических характеристик потока и частицы в виде функции Лагранжа или в виде действия как произведения энергии на характерное время. Для физической адекватности обобщенного параметра рассматриваемому процессу сепарации, необходимо принять в качестве определяющего наиболее характерный для него этап. Наиболее полно сепарацию может охарактеризовать этап схода частицы с линии тока, т.к. физически это, собственно, и есть

процесс ее отделения от несущей трубки тока. При этом можно полагать, что к моменту схода большинство частиц вовлечено потоком в движение так, что стационарно перемещается по линиям тока, т.е. их скорости совпадают со скоростью потока. Влияние последующих перемещений, связанных с выходом из потока, могут быть учтены посредством сопоставления полученного параметра с паспортными характеристиками циклонов.

Проанализируем влияние возможных сил на перемещение частицы во вращающемся потоке при ее движении по круговой линии тока и в момент схода с нее. Сила сопротивления потока

$$\vec{F}_\zeta = \zeta \rho_G \frac{(\vec{u} - \vec{w})^2}{2} S, \text{ Н}, \quad (1.34)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления, ρ_G – плотность газа, \vec{u} – скорость потока, м/с, S – площадь частицы в сечении, нормальном сечению потока, или миделево сечение частицы, м².

Она направлена навстречу вектору относительной скорости $\vec{w}_r = \vec{u} - \vec{w}$, и будет ускорять частицу, если $\vec{u} > \vec{w}$, или тормозить ее, если $\vec{u} < \vec{w}$. В момент совпадения скоростей частицы и потока как векторов ($\vec{w} = \vec{u}$) силы вязкости перестают оказывать воздействие на частицу, и $\vec{F}_\zeta = 0$. Выполнение этого условия еще не означает, что частица сойдет с линии тока. Она была вовлечена потоком во вращательное движение, приобрела при этом соответствующую энергию, и может продолжать движение по инерции со скоростью, по модулю равной скорости потока (т.е. $u - v = 0$), но по прямой (т.е. $\vec{u} - \vec{w} \neq 0$). Как только прямолинейная траектория частицы начнет отличаться от круговой траектории молекул газа, т.е. в момент предполагаемого схода частицы с линии тока, \vec{w} перестанет совпадать с \vec{u} , и поток вновь окажет воздействие на частицу, которое проявится через вновь возникшие в этот момент силы вязкости. При этом, возможно, силам вязкости удастся воспрепятствовать сходу частицы, и она сможет переместиться далее по линии тока. Если же им не удастся удержать частицы на линии тока, то они сепарируются из потока. Таким образом, процесс сепарации частиц будет определяться соотношением сил вязкости и инерционных сил, возникающих при криволинейном движении частицы.

Сила тяжести $\vec{F}_g = m\vec{g}$, Н, действует на частицу в направлении вектора ускорения \vec{g} .

Для сферической частицы

$$\vec{F}_g = \frac{\pi}{6} D_p^3 \rho_p \vec{g}, \text{ Н}, \quad (1.35)$$

где D_p , ρ_p – диаметр, м, и плотность частиц, кг/м³.

Сила тяжести ускоряет частицы на нисходящей траектории потока, способствуя их сходу с линий тока, и замедляет на восходящей, противодействуя сепарации. Однако центробежная сила на криволинейной траектории в типичных для циклонных сепараторов условиях в десятки раз превышает силу тяжести [43], и пренебрежение ею может дать погрешность в пределах 2...3%.

Если движение потока с некоторого момента становится неравномерным (поток начинает ускоряться или замедляться), то на частицу окажут действие силы инерции, направленные противоположно силе \vec{F}_ζ . В циклонных аппаратах это может произойти при изменении сечения после кольцевого пространства, однако при этом заметного расширения вращающегося потока внутрь не происходит. Поэтому силами инерции, возникающими из-за неравномерности движения потока, можно пренебречь.

В криволинейном движении дополнительно имеют место специфические силы. Инерция частицы противодействует изменению вектора ее мгновенной скорости \vec{w} , направленного по касательной к траектории. Поэтому частица в каждый данный момент стремится переместиться тангенциально к криволинейной линии тока и двигаться затем по прямолинейной траектории. На криволинейной траектории частица удерживается за счет действия на нее сил вязкости потока, следствием чего при неизменном модуле \vec{w} является центробежная сила \vec{F}_1 . При переменном модуле \vec{w} дополнительно возникает линейное ускорение или замедление частицы, и ее движение определяется векторным сложением центробежной и касательной сил. Однако неравномерностью движения частиц из-за влияния неравномерности потока можно пренебречь. Правомерно не учитывать также неравномерность, вызываемую столкновениями частиц, вследствие стохастического, ненаправленного характера столкновений. Следовательно, можно не учитывать касательные силы и принять, что действиями сил вязкости при удержании частиц на криволинейных линиях тока создается только центробежное ускорение.

Дополнительным фактором, в целом препятствующим выходу частицы из потока, является радиальный градиент давления, который увеличивается от центра к периферии. При обычных для циклонов параметрах потока различие статических давлений (и, соответственно, плотности потока) по ширине кольцевого сечения может составлять до 30%. Непосредственно же по месту схода частицы с линии тока влияние этого фактора значительно меньше действия центробежной силы. По порядку величины оно одинаково с влиянием силы тяжести, а на нисходящей траектории, в пределах которой идет основной этап сепарации частиц, их

действия направлены противоположно. Следовательно, погрешности пренебрежения силами тяжести и давления в определенной мере взаимно компенсируются.

На вращающиеся в потоке частицы действует сила Магнуса. Если ось вращения частицы горизонтальна, сила Магнуса стремится переместить частицу вверх или вниз, а если вертикальна – то вправо или влево. В последнем случае скорость потока \vec{v} складывается у одной и вычитается у другой боковой поверхности частицы со скоростью увлекаемых при ее вращении газов. Последняя в приповерхностном слое частицы практически совпадает с тангенциальной скоростью ее вращения \vec{v}_T . Если направления вращения частицы и потока совпадают, то у ее боковой поверхности, обращенной к периферии, результирующая скорость будет ниже, а статическое давление – выше, чем те же параметры у противоположной поверхности, и частица будет дрейфовать от центра к периферии. Однако направления и ориентации осей вращения большого числа частиц, очевидно, произвольны. Поэтому стабильный дрейф заметного числа частиц в каком-либо определенном направлении за счет силы Магнуса маловероятен.

На не вращающиеся частицы неправильной (и несимметричной относительно оси потока) формы действует подъемная сила, однако директные перемещения частиц за счет нее также маловероятны, и их учет не представляется необходимым.

Рассматривая задачу в подвижной системе отсчета с вращающейся системой координат, совпадающей с проекцией поверхности вращения потока на горизонтальную плоскость, можно разложить движение частицы как составное на относительное (относительно подвижной системы отсчета), переносное (движение точки потока, в которой находится частица, относительно неподвижной системы отсчета), и поворотное. И если при этом изучение первой составляющей движения частицы упрощается, то из-за последней в неинерциальной вращающейся системе отсчета добавляется поворотное ускорение и характерная для нее кориолисова сила, векторное сложение которой с \vec{F}_1 может в определенных условиях дать силу, сдвигающую частицу к периферии (см., напр., [57, 30]). Однако в момент схода с линии тока скорость частицы практически еще не отличается от скорости потока, т.е. ее относительная скорость равна нулю. Поэтому и при использовании неинерциальной системы отсчета дополнительное кориолисово ускорение в момент схода частицы с линии тока также отсутствует. Кроме того, в данном исследовании неинерциальная система отсчета не будет использоваться. При этом в используемой системе координат, неподвижной относительно поверхности Земли, вследствие поворотного перемещения вместе с ней частиц, движущихся в направлении земного меридиана, сила Кориолиса, конечно, будет иметь место. Однако по

величине она ничтожно мала, и здесь упоминается только во избежание путаницы с предыдущей, дополнительной кориолисовой силой.

В общем случае при сепарации частиц из дисперсных потоков (в особенности из потоков капельных жидкостей вследствие меньшего различия плотности частиц и несущей среды) значительную роль играют силы взаимодействия потоков и частиц, возникающие при турбулентном перемешивании. До оценки их влияния на сепарацию в данной задаче необходимо принять математическую модель движения, и затем проанализировать ее.

Одна из проблем, затрудняющих получение аналитической зависимости для определения параметров сепарации частиц в циклонах, заключается в сложности реальной траектории частиц и потока в целом. Поступая в сепаратор, поток закручивается и перемещается по винтовой траектории (рис. 1.9а): опускается вниз по кольцевому каналу, меняет направление движения на противоположное и выходит из центральной трубы. Такое трехмерное движение не поддается удобной математической трактовке. Из механики известно, что при равноускоренном движении точки по винтовой линии, проходящей по поверхности круглого цилиндра радиусом R с образующей, параллельной оси цилиндра, центростремительное ускорение точки совпадает с нормальным ускорением движения ее проекции по окружности радиусом R . В то же время радиус кривизны винтовой траектории превышает R на величину a^2/R , в которой a представляет коэффициент пропорциональности, м/рад, между вертикальной координатой точки и углом поворота. С учетом этого движение потока в пределах кольцевого канала удастся упростить до вращения в плоскости его поперечного сечения (рис. 1.9б).

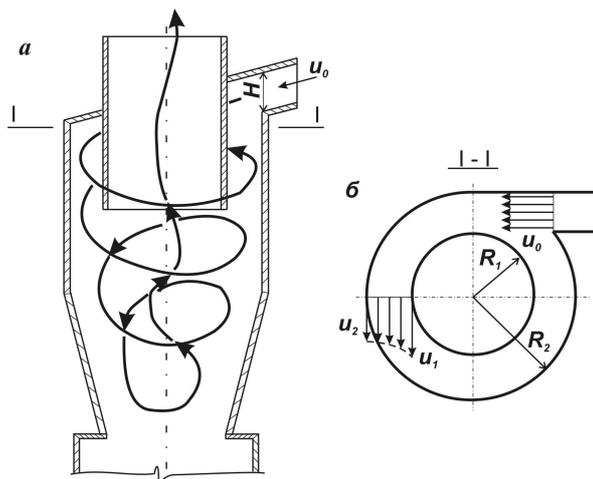


Рис. 1.9 Схема движения потока в циклоне (в кольцевом канале): а, б – продольный и поперечный разрезы; u_0 – скорость потока на входе в циклон; u_1, u_2 – соответственно скорости на внутренней и внешней границах канала

В двумерной задаче радиальное распределение тангенциальных скоростей описывается уравнением

$$uR^k = \text{const} \quad (1.36)$$

Показатель степени k в уравнении вращательного движения для различных видов течения принимают от 1 до -1 . При $k=1$

$$uR = \text{const} . \quad (1.37)$$

Если $k=0$, то скорости постоянны по всему сечению:

$$u = \text{const} . \quad (1.38)$$

При $k=-1$ неизменно отношение скорости к радиусу вращения потока:

$$u/R = \text{const} , \quad (1.39)$$

и в любой точке потока вращение происходит с постоянной угловой скоростью $\omega=u/R$ («квазитвердое» равномерное вращение).

В теоретических исследованиях для потока в кольцевом канале (при условии отсутствия центрального стока) общепринята математическая модель вращательного движения с показателем степени $k = 0,5$ [57, 30]:

$$uR^{0,5} = \text{const} , \quad (1.40)$$

Проанализируем ее с позиции описания характера движения потока. При показателе степени $k = 1$ движение потока характеризуется как потенциальное. Это безвихревой поток, в котором каждая линия тока имеет свою круговую траекторию, описываемую выражением $uR = \text{const}$. При $k = 0$ скорости по сечению постоянны: $u = \text{const}$. В канале с конечным радиусом кривизны эта модель может описывать очень медленное движение вращающегося потока со скоростью, близкой к нулю, что очевидно показывает его ламинарный характер. Таким образом, условие отсутствия в потоке вихрей в пределах $0 \leq k \leq 1$ не нарушается, и движение с $k = 0,5$ также может характеризоваться теоретически как безвихревое. Поэтому в рамках принятой модели (1.40), достаточно точно описывающей движение потока в кольцевых каналах распространенных типов возвратно-поточных циклонов, силы взаимодействия потоков и частиц, возникающие при турбулентном перемешивании, правомерно не учитывать.

В заключение анализа факторов сепарации отметим, что в некоторых ситуациях на частицу могут воздействовать силы, непосредственно не связанные с движением потока: внешние магнитные и электрические поля, другие виды внешних сил. Однако их воздействия эпизодичны, могут быть учтены при наличии конкретных данных, и далее рассматриваться не будут.

Таким образом, на основании проведенного анализа из всех характеристик, оказывающих влияние на сепарацию частиц из потока или их удержание на криволинейной траектории, в качестве основных могут быть выбраны центростремительная сила, созданная потоком через воздействие сил вязкости на частицы, и инерционные силы, возникающие при криволинейном движении частицы. Соответственно, в качестве наиболее существенных факторов, влияющих на эффективность отделения взвеси, являются скорость и существенно влияющие на вязкость физические параметры потока, а также скорость, радиус кривизны траектории и инерционные свойства частиц, которые в криволинейном движении характеризуются не столько массой, сколько моментом инерции. Следовательно, для сепарации частиц с одинаковыми инерционными свойствами, следующих со скоростью \vec{W} по линии тока с радиусом кривизны R , необходимо соответствующим образом увеличить $|\vec{W}|$, или направить их по линии тока с меньшим R .

Можно видеть, что все факторы сепарации, кроме скоростей потока и частицы в момент схода, независимо от вида дисперсных потоков и взвесей, определяются исходными данными задачи. Следовательно, для ее решения целесообразно использовать аппарат теории подобия посредством составления безразмерных комплексов путем приведения уравнений, дающих математическую формулировку изучаемого процесса, к безразмерному виду, что физически эквивалентно их строгому и точному аналитическому решению. При нахождении безразмерного параметра, численное значение которого может характеризовать сепарацию частицы с линии тока, далее будут использованы два метода аппарата теории подобия – анализа размерностей и масштабных преобразований.

Для конкретизации значения константы в (1.40) определяют сначала расход газа в кольцевом канале высотой H на входе циклона (обозначения на Рис. 1.9б):

$$W = u_0 (R_2 - R_1) H . \quad (1.41)$$

Затем находят расход в сечении той же высоты на некотором расстоянии от входа, интегрируя по местным скоростям с учетом их распределения по радиусу в соответствии с (1.40):

$$W = H \int_{R_1}^{R_2} u dR = u R^{0,5} H \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{R^{0,5}} = 2u R^{0,5} H (R_2^{0,5} - R_1^{0,5}) \text{ м}^3/\text{с}. \quad (1.42)$$

Считая, что расход газа через циклон постоянен (утечек и присосов нет), приравнивают (1.41) и (1.42):

$$u_0 (R_2 - R_1) = 2u R^{0,5} (R_2^{0,5} - R_1^{0,5}), \quad (1.43)$$

и получают выражение для изменения скорости по сечению канала:

$$u = u_0 \left(R_2^{0,5} + R_1^{0,5} \right) / 2R^{0,5}. \quad (1.44)$$

На основании проведенного ранее анализа факторов сепарации можно видеть, что частицы удерживает на криволинейной траектории центробежная сила, созданная потоком. Их линейная скорость \vec{w} постоянна, и до схода с линии тока равна скорости потока \vec{u} в этой точке, определяемой выражением (1.44). По сечению канала она будет изменяться от u_2 на границе (при $R=R_2$) до u_1 на (при $R=R_1$):

$$u_2 = \frac{u_0}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \right), \quad (1.45)$$

$$u_1 = \frac{u_0}{2} \left(\sqrt{\frac{R_2}{R_1}} + 1 \right). \quad (1.46)$$

Симплекс R_1/R_2 относится к основным конструктивным параметрам циклонов. Для большинства типов серийных отечественных циклонов его величина составляет 0,59. При таком значении R_1/R_2 скорость на внешней границе потока $u_2 = 0,884u_0$. Далее по сечению канала она монотонно возрастает до величины $u_1 = 1,151u_0$. Таким образом, в криволинейном канале имеет место радиальный градиент скорости. Его форма зависит от выбранной модели вращения, а причина возникновения заключается в наличии центробежной силы. Связь между последней и градиентом скорости определяет соотношение между создающими ее силами вязкости и инерционными силами, которые приобретают частицы при вовлечении их потоком в свое движение. Эту связь удобно выявить через математическое описание вызываемой градиентом скорости неравномерности радиального распределения статических давлений по сечению в потоке, убывающих от некоторого максимального значения p_2 на внешней границе до минимального p_1 на внутренней. Для этого радиальный градиент давления $grad p$ представляют как отношение элементарной силы давления, приходящейся на единицу площади, dP/S , к элементу длины в радиальном направлении dR , т.е. как отношение элементарной силы давления dP к элементарному объему dv . Тогда, с учетом закона Ньютона,

$$grad p = \frac{\partial p}{\partial R} = \frac{\partial P}{S \partial R} = \frac{\partial m}{\partial v} \frac{\partial u}{\partial \tau} = \rho_G \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (1.47)$$

Пренебрегая силами тяжести и трения в потоке, и имея в виду, что при движении с радиусом кривизны R $\partial u / \partial \tau = u^2 / R$, принимают $grad p = \rho u^2 / R$:

$$dp = \rho \frac{u^2}{R} dR. \quad (1.48)$$

Выражая u через u_0 , получают дифференциальное уравнение, характеризующее распределение давления в поперечном сечении вихревого аппарата с конкретными конструктивными (R_1, R_2) и энергетическими (u_0) параметрами:

$$dp \approx \rho \frac{u_0^2}{R} \frac{(R_2^{0,5} + R_1^{0,5})^2}{(2R^{0,5})^2} dR = \rho \frac{u_0^2}{4} (R_2^{0,5} + R_1^{0,5})^2 \frac{dR}{R^2}. \quad (1.49)$$

Выделим в (1.49) комплекс постоянных величин

$$\rho \frac{u_0^2}{4} (R_2^{0,5} + R_1^{0,5})^2 = f_R. \quad (1.50)$$

Введенная нами величина, обозначенная f_R , является константой с единицей измерения Н/м. Она может быть представлена как градиент силы в радиальном направлении, соответствующий центростремительному ускорению в криволинейных потоках. Проинтегрируем (1.49) по ширине канала с использованием введенной константы:

$$\int_{p_1}^{p_2} dp \approx \int_{R_1}^{R_2} f_R \frac{dR}{R^2}; \quad p_2 - p_1 \approx f_R \left(-\frac{1}{R} \right) \Big|_{R_1}^{R_2} = f_R \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (1.51)$$

Из (1.51) по известному (например, измеренному) давлению у внешней границы потока p_2 можно найти p_1 :

$$p_1 \approx p_2 - f_R \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (1.52)$$

По допущению (1.48) еще можно оценивать соотношения значений p во всех точках полей давлений от p_2 до p_1 в сечениях ниже кольцевого канала (сечения 1-1, 2-2, 3-3 на рис. 1.10), предполагая, что средняя скорость потока u_m соизмерима с u_0 . По крайней мере, в сечении 1-1 непосредственно под выхлопной трубой такое приближение картины движения еще не исказит, и

$$p \approx p_2 - f_R \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (1.53)$$

Для точки сечения, где $p=0$,

$$p_2 \approx f_R \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (1.54)$$

$$R \approx 1 / \left(\frac{p_2}{f_R} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (1.55)$$

Найдем значение R , соответствующее нулевому давлению $p=0$, для обычных рабочих условий циклонов типа ЦН: $p_2=500$ Па; $u_0=5$ м/с; $R_2=0,5$ м; $R_1/R_2=0,59$; $\rho=1,293$ кг/м³. Для этого вычислим константу f_R по (1.50):

$$f_R=0,25 \cdot 1,2935^2 [0,5^{0,5} + (0,5 \cdot 0,59)^{0,5}]^2 \approx 12,6 \text{ Па} \cdot \text{м}.$$

Найдем по (1.55) искомое значение R :

$$R = 1 / [(500/12,6) + (1/0,5)] \approx 0,024 \text{ м}.$$

Согласно приведенному расчету, при вращении потока с постоянной плотностью по модели $uR^{0,5} = const$ в центре сечения 1-1 циклона, работающего с заданными параметрами, имеет место область разрежения диаметром около 50 мм, что объясняет причину изменения направления движения потока по центру циклона под выхлопной трубой. В то же время средняя скорость потока u_m равна начальной скорости u_0 только во входном сечении кольцевого канала. Энергия потока по мере продвижения в циклоне затрачивается на преодоление силы трения и создание центробежного ускорения. Средняя скорость потока непрерывно падает, а интенсивность крутки снижается. В исходной математической модели движения потока через циклон (1.34, 1.36) это явление может быть отражено уменьшением показателя степени k с приближением к 0. Поток становится слабозакрученным (1.34), и скорости по радиусу начинают выравниваться. Вместе с ними выравниваются статические давления, что приводит к сужению зоны отрицательных давлений (сечение 2-2, Рис. 1.10). Затем она может полностью исчезнуть (сечение 3-3 и ниже); с этого момента поток поворачивает вверх по всему сечению потока и уходит в выхлопную трубу.

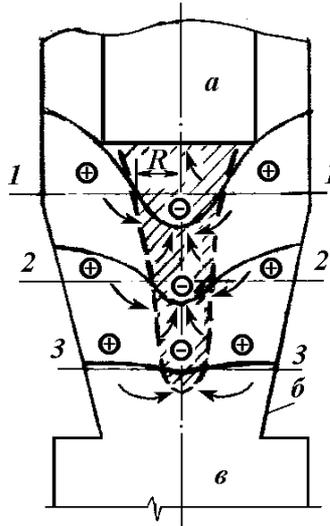


Рис. 1.10 Распределение давлений в радиальном направлении и по высоте циклона: а – выхлопная труба, б – корпус, в – бункер, R – радиус зоны разрезания. Заштрихована зона обратных токов.

Ввиду сложного характера движения потоков в циклонах теоретические выкладки пригодны в основном для качественного описания движения потока и не дают необходимой для практического применения точности в расчетах параметров гетерогенных потоков и степени их очистки. Степень очистки выбросов с полидисперсным загрязнителем у сконструированных и эксплуатируемых циклонных аппаратов определяется эмпирически. Приведенный пример показывает достаточную корректность введенной выше константы f_R при описании движения потока в пределах кольцевого канала циклона и непосредственно под ним. Это наиболее характерная для осаждения взвеси зона аппарата вследствие максимальной скорости и интенсивности крутки в ней. Далее значение f_R может быть использовано в качестве характерного параметра для расчетного определения степени очистки сепараторов с вращающимся потоком.

1.3.4 Осаждение частиц пыли на решетках и др. неподвижных препятствиях

В теории фильтрации априори принимается, что частица будет захвачена препятствием, как только коснется его (зацепится за него) или столкнется с ним. Развитие теории происходит в направлении изучения сил, ведущих к столкновению или зацеплению (касанию). В качестве основных причин столкновения частиц с препятствием рассматривают инерцию, гравитацию и диффузию.

Инерционный захват

Под инерционным захватом подразумевают столкновение взвешенной в потоке частицы с препятствием, происходящее преимущественно под действием инерционных сил. Вблизи препятствия в потоке одни частицы движутся по линиям тока и огибают его вместе с молекулами газа, другие продолжают перемещаться по инерции в прежнем направлении, сходят с линий тока (аналогично сепарации в циклонах) и контактируют с препятствием. Характер перемещения определяется соотношением действия сил инерции и сопротивления. Возможность контакта оценивают количественно через значения чисел Рейнольдса и Стокса.

Обычно используется модификация числа Рейнольдса для препятствия Re_{ob} , в котором за определяющий размер принят его эквивалентный диаметр. Течение с $Re_{ob} \leq 1$ рассматривается как ламинарное (вязкое, стоксовское), т.к. поле скоростей в потоке формируется под влиянием вязкого (ламинарного) подслоя (рис. 1.11а). Предполагается, что с увеличением скорости ($Re_{ob} \approx 1 \dots 10$ и более) невозмущенная часть потока становится ближе к препятствию, и линии тока изгибаются круче. За препятствием появляются отрывные течения (вихри), а толщина вязкого подслоя уменьшается. В режиме $Re_{ob} > 1000$ подслоем перестает заметно влиять на формирование скоростей потока вне самого себя. Такое течение называют потенциальным (идеальным), вязкостью потока пренебрегают. Считается, что линии тока в этом режиме обтекания сворачивают (непосредственно) перед препятствием.

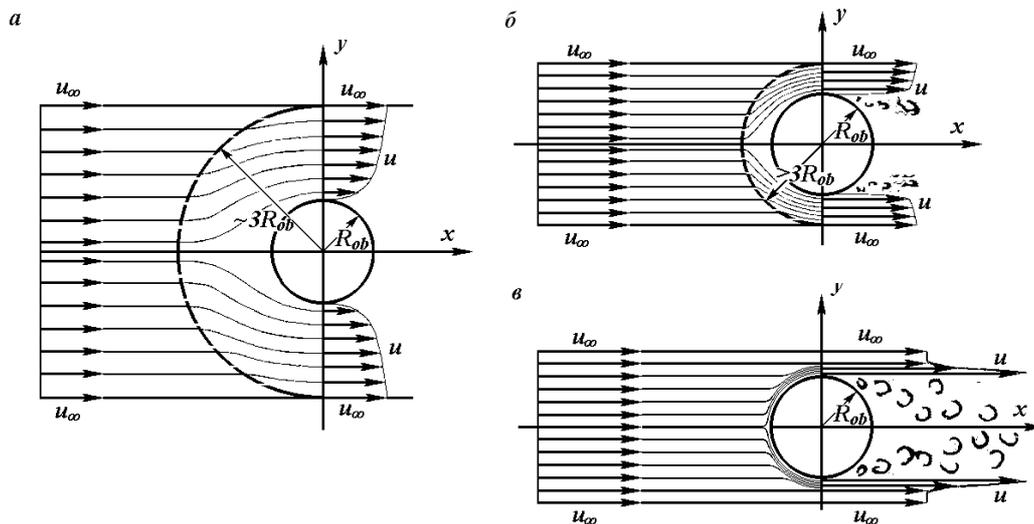


Рис. 1.11 Течение потока вблизи препятствия.

a – вязкое (ламинарное), $Re_{ob} < 1$; *б* – переходное, $Re_{ob} \approx 1 \dots 10$; *в* – потенциальное (идеальное), $Re_{ob} > 1000$; u_{∞} – скорость невозмущенного потока, R_{ob} – характерный размер (радиус) препятствия

Представленная картина течения получена при опытном изучении обтекания крупных препятствий с размерами от 0,5...1 дюйма и более. Она используется в теории фильтрации в качестве исходной модели, т.к. получение достоверных данных по обтеканию тонких препятствий размером менее 100 мкм связано с серьезными проблемами, в т.ч. в области экспериментальной техники.

Характеристику инерционного осаждения частицы на препятствии – число Стокса, получают, представляя в безразмерном виде уравнение движения сферической частицы радиусом r_p под действием силы сопротивления

$$m \frac{dw_p}{d\tau} = F_1 = 3\eta\pi D_p (u - w_p) = 6\eta\pi r_p (u - w_p), \quad (1.56)$$

введя безразмерные скорости частицы $W_p = w_p/u_\infty$ и потока $U = u/u_\infty$, безразмерное время (с масштабом времени R_{ob}/u_∞) $T = \tau \cdot u_\infty / R_{ob}$:

$$\rho_p \frac{4}{3} \pi r_p^3 \frac{dW_p}{dT} \frac{u_\infty^2}{R_{ob}} = 6\eta\pi r_p u_\infty (U - W_p); \quad (1.57)$$

$$\frac{2}{9} \frac{r_p^2}{R_{ob}} \frac{\rho_p}{\eta} u_\infty \frac{dW_p}{dT} + W_p = U. \quad (1.58)$$

Здесь ρ_p , w_p – плотность, кг/м³, и скорость, м/с, частицы; u_∞ , u – скорости невозмущенного потока и потока вблизи препятствия, м/с.

Выделяя в дифференциальном уравнении (1.58) группу сомножителей постоянных величин, представляют число Стокса:

$$\frac{2}{9} \frac{r_p^2}{R_{ob}} \frac{\rho_p}{\eta} u_\infty \equiv \text{Stk}, \quad (1.59)$$

$$\text{Stk} \frac{dW_p}{dT} + W_p = U. \quad (1.60)$$

Считается, что число Stk , как и Re , характеризует соотношение сил инерции (плотность, размер) и сопротивления (вязкость).

При $\text{Stk} = 0$ $W_p = U$, $w_p = u$. Это означает, что скорость частицы у препятствия совпадает со скоростью потока. Следовательно, она будет обтекать препятствие вместе с потоком газа,

перемещаясь по изогнутой линии тока. Частицы, число Стокса для которых окажется выше некоторой критической величины Stk_{cr} , не смогут следовать по линиям тока перед препятствием. Если продолжения невозмущенных линий тока, на которых они находились, пересекаются с препятствием, то эти частицы столкнутся с ним, что и считается инерционным захватом.

Исходя из изложенного можно было бы полагать, что коэффициент инерционного захвата η_{Stk} равен нулю при $Stk < Stk_{cr}$. Однако на практике это условие корректно не соблюдается. Поэтому считают, что коэффициент осаждения зависит и от режима обтекания, и находят его по эмпирическим зависимостям типа

$$\eta = f(Stk, Re_{ob}) \quad (1.61)$$

При вязком обтекании цилиндра, по [57], $Stk_{cr}=4,3$, шара – 0,6. Значения Stk_{cr} при потенциальном обтекании цилиндра составляют (по [43]) приблизительно 1/8, шара – 1/12, тогда как (по [57]), возможно, 1/8 и 1/24. В [57] приводится также выражение для режима вязкого обтекания шара:

$$\eta_{Stk} = \left(1 + \frac{0,77 \ln(4Stk)}{2Stk - 1,214} \right)^2. \quad (1.62)$$

При потенциальном режиме по [57] степень осаждения на цилиндре можно оценить по эмпирическому выражению

$$\eta_{Stk} = Stk^3 / (Stk^3 + 1,54Stk^2 + 1,76), \quad (1.63)$$

на шаре – по выражению

$$\eta_{Stk} = Stk^2 / (Stk + 0,125)^2. \quad (1.64)$$

В то же время по [43] при $Stk > 0,2$, т.е для переходного и потенциального режима, для шара можно использовать выражение

$$\eta_{Stk} = Stk^2 / (Stk + 0,7)^2. \quad (1.65)$$

В [43] также отмечается, что ни одна из теорий по эффективности улавливания частиц одиночным препятствием, таких как (Sell, W., 1931; Albrecht, F. Z., 1931; Bosanquet, S.H.; 1950, Langmuir, I., Blodgett, K., 1946; Das, P.K., 1950; Davies, S.N., 1952; Percy, T., Hill, G.W., 1957; Hocking, L.M., 1959; Pemberton, C.S., 1960; Picknett, R.G., 1960; Walton, H.W., Woolcock, A.,

1960), не согласуется полностью с экспериментальными данными. В дополнение к этому представляется, что автоматический перенос опытных результатов обтекания крупных препятствий может быть сопряжен со значительной погрешностью ввиду несоизмеримости характерных размеров потока и обтекаемого волокна. Поэтому здесь необходимо специальное изучение картины обтекания тонких препятствий посредством численного эксперимента и использованием методов *CFD*.

Осаждение при касании (зацеплении)

Касание считается основным эффектом, от которого зависит степень осаждения частиц при фильтрации аэродисперсной системы. Степень захвата касанием определяется из предположения, что препятствия коснутся (зацепят) все частицы, траектории которых проходят от его поверхности на расстоянии менее половины их характерных размеров. Безразмерный параметр захвата касанием представляется как

$$R_{ich} = r_p / R_{ob} . \quad (1.66)$$

Предположение справедливо, если траектории частиц соответствуют перемещениям их геометрических центров. Такое условие будет точно соблюдаться для жестких однородных частиц правильной геометрической формы, свойства которых не изменяются в потоке из-за механических деформаций, фазовых, химических или др. превращений. Оценочно степень осаждения вследствие захвата касанием при $r_p \ll R_{ob}$ и потенциальном обтекании цилиндра и шара, соответственно,

$$\eta_{ich} \approx (1...2) R_{ich} , \quad (1.67)$$

$$\eta_{ich} \approx (2...3) R_{ich} . \quad (1.68)$$

Если $r_p > R_{ob}$, то $\eta_{ich} \sim n(1 + R_{ich})^2$, где n – коэффициент пропорциональности.

Диффузионное осаждение.

Контакт с препятствием вследствие диффузии существенен для частиц субмикронного размера (менее $2...3 \cdot 10^{-7}$ м). Они ощущают удары молекул и перемещаются в ламинарном потоке аналогично броуновскому движению, но менее интенсивно. Огибая препятствие по линии тока на большом расстоянии, частицы могут сойти с нее после соударения с молекулами и столкнуться с препятствием. Оценочный расчет степени осаждения субмикронной взвеси при обтекании цилиндрического препятствия был выполнен Лэнгмюром.

При постановке задачи предполагалось, что диффузионное осаждение частиц может происходить только из слоя потока толщиной δ в пределах углов от $\pi/6$ до $5\pi/6$ (Рис. 1.12).

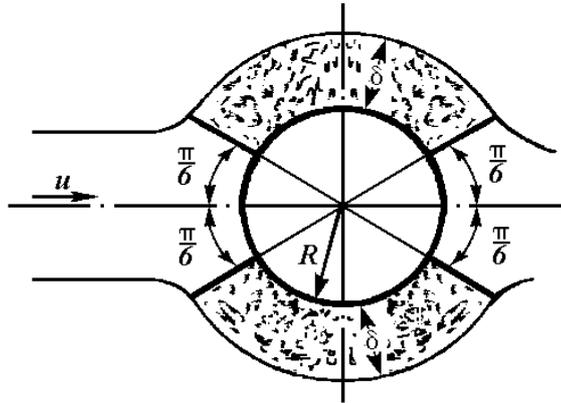


Рис. 1.12 Условия определения коэффициента диффузионного осаждения по Лэнгмюру [

Лэнгмюром получена формула:

$$\eta_D = 2 \left[\frac{1}{2(2 - \ln \text{Re})} \right]^{1/3} \frac{1}{\text{Pe}_D^{2/3}}, \quad (1.69)$$

где $\text{Pe}_D = 2uR/D$ – диффузионное число Пекле; D – коэффициент диффузии, м²/с.

В количественном отношении она носит ориентировочный характер, но до сих пор имеет самостоятельное теоретическое значение и используется как базовая при обработке результатов экспериментов методами теории подобия. Эмпирические уравнения для вычисления коэффициента диффузионного захвата в вязком и потенциальном режимах обтекания препятствия, имеют, соответственно, вид:

$$\eta_D = 3 \left(\frac{1}{2 - \ln \text{Re}} \right)^{1/3} \frac{1}{\text{Pe}_D^{2/3}}, \quad (1.70)$$

$$\eta_D = 3 / \text{Pe}_D^{1/2}. \quad (1.71)$$

Выражения (1.70, .1.71) показывают, что Лэнгмюром было получено соотношение, качественно удовлетворяющее реальным процессам диффузионного осаждения по всему диапазону режимов обтекания препятствия – от вязкого до потенциального. Одну из причин этой универсальности можно обнаружить в использовании диффузионного критерия Пекле Pe_D , представляемого, как и Re , через отношение действий, т.е. через одну из наиболее общих (универсальных) количественных характеристик физических, химических и др. видов движения

материи. В данном случае это, очевидно, отношение удельного (на единицу массы газовой среды) действия uR , которое совершает поток при обтекании со скоростью u препятствия радиусом R , к удельному (на единицу массы дисперсной части) действию D , которое имеет возможность совершить частица, преодолевая сопротивление среды при диффузии к препятствию. Таким образом, выражения (1.69, 1.70, 1.71) являются теоретическим и эмпирическим подтверждением корректности и целесообразности использования такой характеристики, как действие, для обобщения результатов исследований различных природных явлений.

В волокнистых фильтрах, используемых преимущественно для тонкой обработки выбросов с особо опасными для окружающей среды или здоровья людей загрязнителями, волокна имеют диаметры порядка нескольких микрометров, а расстояние между ними на порядок больше. Они образуют плотный пористый слой с высокой степенью очистки и большими затратами энергии на продувку, что обычно связано с количеством выбросов. Так, на фильтрационную обработку вентиляционных выбросов АТЭС и АЭС уходит до четверти вырабатываемой ими электроэнергии. Совершенствование теории фильтрации и поиск конструкторских решений с целью снижения энергозатрат при сохранении высокой степени очистки представляет, наряду с теоретическим, и очевидный практический интерес.

Процесс фильтрации теоретически изучен только на простых моделях. Прежде всего, предполагается, что концентрация взвешенных частиц в обрабатываемом потоке ничтожно мала. С этим пренебрегают структурными изменениями, непрерывно идущими в фильтрующем слое из-за накопления уловленных частиц между волокнами, и рассматривают фильтрацию как стационарный процесс. Непротиворечивой физико-математической модели осаждения частиц на фильтрующем слое с нестационарной хаотически меняющейся структурой не создано. В рамках стационарного фильтрующего слоя моделей фильтрации с его реальной начальной структурой пока также нет. Вместо оседания частиц в пространстве, заполненном волокнами, рассматривается модель осаждения одной частицы из потока, поперечно обтекающего одиночный цилиндр. Влияние соседних волокон учитывают через осредненные и габаритные характеристики (толщину слоя, плотность упаковки волокон), иногда через непосредственно измеренные параметры.

При изучении фильтрации необходимо еще иметь в виду, что столкновение частиц с одиночным цилиндром – это уже результирующее явление. Оно складывается из взаимосвязанных и согласованных действий на частицу нескольких эффектов – инерции, диффузии, гравитации, и др. В зависимости от параметров потока, частиц и пористого слоя, ослабления или усиления отдельных эффектов другими эффектами вклад каждого может

изменяться от 0 до 1. Для его точного определения необходимо учесть все связи, все многообразие взаимодействий реальных объектов. Во избежание грубых просчетов, например, чтобы итоговый коэффициент захвата η_{Σ} не превосходил единицы, его представляют в виде:

$$\eta_{\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \eta_i), \quad (1.72)$$

где η_i – коэффициент захвата вследствие действия i -го учитываемого эффекта; N – число учитываемых эффектов.

Если учитываются только эффекты инерции и касания, то в соответствии с (1.72) итоговый коэффициент осаждения

$$\eta_{\Sigma} = 1 - (1 - \eta_{Stk})(1 - \eta_{tch}). \quad (1.73)$$

Такая форма вычислений учитывает взаимовлияние эффектов постольку, поскольку простым суммированием отдельных коэффициентов нельзя найти результат каких-либо взаимосвязанных действий вообще. Алгебраическое суммирование может отобразить одновременное действие только независимых друг от друга эффектов, а (1.73) кроме двух независимых слагаемых содержит т. наз. «перекрестный», или «интерференционный», член:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{Stk} + \eta_{tch} - \eta_{Stk} \eta_{tch}. \quad (1.74)$$

Пока адекватность теоретического описания реального взаимодействия осаждающих эффектов в процессе фильтрации этим ограничивается. В теоретических моделях итоговые коэффициенты осаждения определяют по полуэмпирическим формулам. Для модели с малой плотностью упаковки волокон (аналогичной модели осаждения на одиночном цилиндре) используют формулу Дэвиса:

$$\eta_{\Sigma} = \left[R_{tch} + (0,25 + 0,4R_{tch}) \left(Stk + \frac{2}{Pe} \right) - 0,263 \left(Stk + \frac{2}{Pe} \right)^2 \right] \times (0,16 + 10,9\alpha - 17\alpha^2), \quad (1.75)$$

где α – плотность упаковки.

Как следует из (1.75), в модели Дэвиса учитываются захваты касанием и инерционным.

В модели Лэнгмюра вводится поправка на влияние соседних волокон. В основе также предполагается, что волокна представляют собой одиночные цилиндры. Наличие соседних волокон учитывают через измеряемое экспериментально гидравлическое сопротивление фильтра Δp_r , и через относительную (приведенную) скорость w_{rl} . Итоговую степень осаждения подсчитывают по коэффициентам захвата касанием и диффузионному:

$$\eta_{\Sigma} = 1 - (1 - \eta_{tch})(1 - \eta_D). \quad (1.76)$$

Значения η_{tch} и η_D в (1.76) находят из выражений:

$$\eta_{tch} = \left(\frac{w_{rl}}{u} \right) \left[2(1 + R_{tch}) \ln(1 + R_{tch}) - (1 + R_{tch}) + (1 + R_{tch})^{-1} \right], \quad (1.77)$$

$$\eta_D = \left(\frac{w_{rl}}{u} \right) \left[2 \left(1 + \frac{x_0}{R} \right) \ln \left(1 + \frac{x_0}{R} \right) - \left(1 + \frac{x_0}{R} \right) + \left(1 + \frac{x_0}{R} \right)^{-1} \right]. \quad (1.78)$$

Параметр толщины слоя, из которого происходит диффузионное осаждение частиц, есть отношение

$$\frac{x_0}{R} = \left(\frac{0,56D}{w_{rl}R} \right)^{1/3}, \quad (1.79)$$

где D – коэффициент диффузии; R – радиус волокна,

Приведенная скорость вычисляется по реальному перепаду давления на фильтре с высотой слоя H :

$$w_{rl} = \frac{\Delta p_r R^2}{8\alpha\eta H}, \quad (1.80)$$

где η – вязкость газа.

Другие расчетные модели разработаны и применяются для конкретных способов упаковки волокон в фильтрах. Среди них можно отметить веерную модель Фукса, в которой предполагается, что фильтр составлен из параллельных решеток, повернутых относительно друг друга на произвольные углы. Такая модель, вероятно, ближе к реальной структуре фильтра, но расчетные зависимости более громоздки и менее удобны.

Для обработки аэрозольных загрязнителей достаточно широко применяется электрофильтрация, имеющая высокий коэффициент осаждения мелких частиц. На процесс

электроосаждения влияют электрические и аэродинамические параметры частиц и потока. Электрофильтрация в работе не рассматривается ввиду необходимости выполнения самостоятельных специфичных исследований, не входящих в круг задач, поставленных для данного исследования.

1.3.5 Анализ применимости конденсационных, сорбционных и термических методов к дегалогенизационной очистной обработке газоздушных потоков производственных помещений с КРУЭ

Ряд газофазных загрязнителей глобального действия, включенных в список ООН от 1986 г. как влияющие на озоновый слой, а также в список парниковых газов, относится к галогенсодержащим веществам. Как было отмечено, выбросы одного из галогенов, а именно – гексафторида серы, могут происходить в производственных помещениях генерирующих предприятий. Проведем сравнительный анализ используемых в РФ и за рубежом способов обезвреживания галогенсодержащих веществ.

В 80-х годах XX века годовое количество выбросов только хлорсодержащих соединений оценочно составляло не менее 2...5 миллионов тонн. Всемерное сокращение, а затем и полное прекращение их использования в процессе производства должно было стать мировой тенденцией конца прошлого века ([68]), однако не стало. С этим осталась актуальной еще не на одно десятилетие и проблема обезвреживания подобных отходов. К настоящему времени в мире практикуется обработка газовых выбросов с содержанием галогенов посредством конденсации, сорбции и термообезвреживания [69, 70]. Выбор метода обезвреживания определяется специфическими особенностями абгазов, как то: видом соединения галогена, его концентрацией, объемом отбросных газов, наличием в них других компонентов и т.д.

Конденсационная обработка

При конденсации токсичные компоненты охлаждаются до температуры точки росы промывкой или другими способами [71]. В существующих установках конденсационной очистки газов с промывкой водой, даже при ее значительных расходах, не удается достичь приемлемой степени очистки абгазов ([72, 73]). Более эффективна конденсация галогенсодержащих соединений в поверхностных теплообменниках при отрицательной температуре с использованием хладоносителей. К примеру, такие летучие соединения, как метилхлорид, хлороформ, дихлорэтан с концентрациями порядка 10 г/м³ удается уловить при температурах (-5)...(-10) °С на 90% и более. Однако ПДК большинства соединений хлора

имеют значения менее 1 мг/м^3 . Поэтому конденсация может использоваться в качестве предварительной ступени очистной обработки.

Типовые методы поверочных и конструктивных расчетов разработаны на фундаментальной теоретической основе для случая конденсации насыщенных паров индивидуальных веществ в трубчатых конденсаторах. Для такого же случая производителями соответствующего оборудования разрабатываются методики расчетов пластинчатых, спиральных и др. типов конденсаторов. Для случая конденсационной обработки выбросов, концентрации конденсируемых загрязнителей в которых обычно составляют порядка нескольких процентов, необходима их корректировка.

Определение геометрических размеров и температурных режимов теплоносителей теплообменника, в котором предполагается обработка смеси неконденсирующихся газов и конденсирующихся паров, имеет ряд существенных особенностей. Основное отличие в том, что в процессе удаления из выбросов конденсируемого компонента температура его конденсации непрерывно снижается, тогда как в типовых методиках она предполагается постоянной. Специфика также в том, что температура поступающего на обработку выброса, как правило, соответствует перегретому состоянию паров конденсируемых компонентов. Процесс идет в две стадии: охлаждение выбросов до температуры начала конденсации и последующее охлаждение с конденсацией до конечной температуры. Соотношение количества теплоты, отводимой на каждой стадии, определяет схему обработки выбросов. На настоящее время типовые методики конденсационной обработки выбросов с конденсирующимися загрязнителями отсутствуют. Необходима специфичная схема расчета конденсаторов для удаления смеси конденсируемых компонентов из неконденсирующегося потока газа.

Сорбционная обработка

Для адсорбционной очистки промышленных хлорсодержащих выбросов обычно используется активированный уголь ([74, 75, 76]). Он является универсальным адсорбентом, работающим во влажной среде. В [77] проводилось исследование адсорбции хлористого водорода из потока газа природными материалами. Авторы исследовали 8 минералов и пришли к выводу, что наибольшей поглотительной способностью обладает черкасский палигорскит. Изучалась также адсорбционная способность оксида алюминия по хлористому водороду и другим вредным соединениям, содержащимся в абгазах производства хладонов. Наиболее часто применяемая схема адсорбционной очистки состоит из аппаратов предварительной очистки от различных примесей, адсорбционных колонн и системы отгонки десорбированных

хлорсодержащих соединений от воды. Работа адсорбционных колонн периодическая, т.к. после насыщения адсорбента требуется его десорбция. Десорбция активированного угля производится паром. В работе [78] указывается, что такая система позволяет эффективно улавливать пары хлорсодержащих растворителей (95-98%) и возвращать их в цикл. Адсорбционный способ очистки отбросных газов от хлорсодержащих соединений имеет и ряд недостатков. Основные среди них – сложность применения адсорбентов при очистке высокотемпературных газов, большое гидравлическое сопротивление слоя адсорбентов, слабая сходимости расчетов величины адсорбции.

Явление адсорбции имеет отчетливый квантовый характер. Количество адсорбата, удерживаемое на единичной площади поверхности раздела фаз, в конечном счете определяется силой взаимодействия между молекулами адсорбируемого вещества и частицами, находящимися в приповерхностных слоях адсорбента. Изучению способности поверхностных частиц конденсированных тел за счет избытка своей энергии притягивать и удерживать молекулы газа посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований, учитывающих квантовый характер процесса. Однако пока теоретическая основа реального процесса адсорбции не разработана. Исследуются только упрощенные модели. В теоретических исследованиях исходным упрощением, существенно отдаляющим модель от реальности, является обособленное изучение одной из двух предельных форм проявления силы адсорбционного взаимодействия – вандерваальсовых (дисперсионных) и обменных сил. Для модели чисто физической адсорбции приходится принимать, что в процессе дисперсионных взаимодействий при удержании молекул газа на поверхности адсорбента электронного обмена не происходит и химическая связь не образуется. Силу, возникающую при взаимодействии квантовых электрических полей поверхностных частиц и молекул газа, участвующих в адсорбции, часто называют вандерваальсовыми силами, а иногда выделяют и другие компоненты. В простейших случаях они могут быть вычислены по уравнениям квантовой механики.

Одной из целей данной работы является приложение квантовомеханических расчетов к техническим задачам, для чего достаточно рассматривать силу взаимодействия квантовых электрических полей, которая далее в работе традиционно называется силами Ван-дер-Ваальса или дисперсионными силами. Согласно квантовомеханическим расчетам, они резко убывают с увеличением расстояния между центрами зарядов взаимодействующих элементов. Оценочно эту зависимость представляют обратно пропорциональной 6-й степени расстояния. Для улучшения сходимости с опытными результатами расчетов в рамках модели чисто физической адсорбции добавляют, кроме дисперсионного притяжения, силу отталкивания, принимая ее

обратно пропорциональной 12-й степени расстояния между центрами зарядов. Если взаимодействующие частицы имеют постоянные дипольные моменты (например, молекулы воды или ионные поверхности) или свободные электроны (металлические поверхности), то между ними возможно также действие классических электростатических сил. Точный теоретический расчет их величины невозможен, хотя на практике они могут определять характер процесса адсорбции. Так, например, гораздо более широкое применение в производственных условиях активированных углей по сравнению с синтетическими полярными адсорбентами – силикагелями, цеолитами, объясняется тем, что угли ввиду отсутствия полярности у поверхностных частиц одинаково взаимодействуют и с полярными, и с неполярными молекулами газовой фазы. Молекулы воды, обладая постоянным дипольным моментом, в паровой фазе взаимно притягиваются и диффундируют к поверхности хуже неполярных молекул. Поэтому активированный уголь достаточно эффективно извлекает загрязнители из влажных газов, тогда как полярные адсорбенты способны извлекать из них лишь воду. Результаты теоретических расчетов физической сорбции имеют низкую сходимость с опытными данными и пригодны только для качественной оценки процессов.

По другой из граничных моделей предполагается образование химической связи между молекулой газа и частицей адсорбента при отсутствии действия вандерваальсовых сил. Такую модель называют химической сорбцией, или хемосорбцией. Для теоретических расчетов энергии процесса хемосорбции используют уравнение Шредингера. Его строгое и точное решение получено для случая взаимодействия одного протона и одного электрона. Теоретические методы расчетов более сложных систем весьма громоздки, а их результаты плохо совпадают с опытными данными, вследствие чего они не приспособлены для прикладного использования. Поэтому проектно-конструкторские расчеты адсорбционных систем и аппаратов в настоящее время основаны на термодинамических аспектах и упрощенных балансовых моделях с множественными эмпирическими уточнениями. В то же время адсорбция продолжает оставаться основным, а иногда – единственным способом очистки воздуха и выбросов, т.к. может быть применена для извлечения любых загрязнителей из газового потока. Необходима адаптация теоретических методов расчетов к решению практических задач создания адсорбционных устройств нового поколения с надежными адсорбентами селективного действия и приемлемыми затратами энергетических и материальных ресурсов.

При абсорбционной очистке выбросов в качестве сорбентов наиболее часто используют воду. В некоторых случаях применяются растворы солей, кислот, щелочей, вязкие масла и др. жидкофазные вещества. Одним из способов поглощения хлора из отбросных газов является абсорбция раствором щелочи с концентрациями до 200 г/л. При этом может иметь место

реакция $\text{Cl}_2 + 2\text{NaOH} = \text{NaCl} + \text{NaOCl} + \text{H}_2\text{O}$. Очистку отходящих газов от хлористого водорода и других вредных веществ в США производят в горизонтальных скрубберах с насадкой из полипропилена. Для предотвращения проскока нерастворившихся газов после скруббера устанавливают колонны с активированным углем. Определена оптимальная температура абсорбции хлористого водорода, равная $-15 \dots -20$ °С и сорбционная (поглотительная) емкость абсорбентов по дихлорэтану и другим хлорсодержащим соединениям. В [79] рассматривается способ очистки вентиляционных выбросов, содержащих пары соляной кислоты, который позволяет регулировать степень охлаждения и время контакта в абсорбере. Разработке способа очистки вентиляционных выбросов посвящена также работа [80]. Описана схема абсорбции хлористого водорода в условиях, аналогичных предыдущим. Газы с хлористым водородом подаются на насадочную колонну, где он сорбируется при атмосферном давлении. Скорость потока контролируется по количеству тепла, выделяющегося при растворении хлористого водорода. Оборудование выполнено из фенолформальдегидной смолы.

Абсорбционный метод имеет ряд недостатков. Большинство сорбентов обладает селективной способностью поглощения газов. Для обработки многокомпонентных хлорсодержащих смесей требуется многоступенчатая система очистки и регенерация самого сорбента, что удорожает и усложняет эксплуатацию. Низка эффективность очистки газов с концентрацией загрязнителей менее 1000 мг/м^3 . Наличие кислорода, углеводородов и хлорсодержащих соединений в выбросах приводит к образованию нерегенерируемых побочных продуктов и окончательному загрязнению абсорбента. Тем самым проблема загрязнения атмосферы подменяется загрязнением воды и почвы.

Термообработка

При термокаталитической обработке выбросов в качестве катализаторов используются благородные металлы или оксиды основных металлов. В работе [81] представлены результаты испытания установки каталитического сжигания хлорсодержащих выбросов. Очистка отбросных газов проводилась в псевдооживленном слое. Диаметр реактора составлял 0,914 м, слой катализатора поддерживался в пределах 0,15...0,24 м. Пропускная способность установки $27 \text{ м}^3/\text{мин}$. В [32] исследовалось каталитическое окисление дихлорэтана на платиновом катализаторе АП-56. При температуре $420 \dots 450$ °С конверсия дихлорэтана составляла более 90%. Испытания катализаторов для окисления хлорсодержащих органических соединений ([33]) показали эффективность катализатора АП-56. Отмечается, что заметную активность

также проявляют катализаторы на основе меди, однако при температуре выше 400°C они летучи.

В наших исследованиях по сорбционному крекингу смеси паров метиленхлорида и параклорфенола интенсивная возгонка хлоридов меди при пропуске паров через медную сетку наблюдалась непосредственно начиная с 250..300°C. Ввиду недостаточной надежности медные катализаторы нецелесообразно применять в процессах обработки хлорсодержащих выбросов.

В работе [34] установлено, что оптимальными условиями каталитического окисления дихлорэтана при концентрации 0,1 г/м³ в присутствии катализатора М-2 являются температура 450°C и объемная скорость 4000 ч⁻¹. При той же температуре испытывали катализаторы АП-56 и НИИОГаз-ЗД для обработки отходящих газов производства кинофотопленок ([35]). На первом катализаторе эффективность по метиленхлориду не превышала 90%, на втором – 60%. Недостатками каталитического сжигания отбросных хлорорганических соединений являются: высокая стоимость катализатора, потеря активности катализатора в процессе работы. Практически невозможно применять каталитическое сжигание в условиях нестабильности состава и количества газовых выбросов, что чаще всего наблюдается на практике. Кроме того, хлорсодержащие соединения или продукты их разложения являются ядами для всех катализаторов, вызывая их быстрый выход из строя и необходимость частой замены в процессе работы. Наконец, ни в одной из рассмотренных экспериментальных работ не отмечается полный состав продуктов сгорания. Эффективность каталитического обезвреживания оценивается лишь по степени конверсии исходного хлорсодержащего соединения. Вместе с тем очевидно, что катализирующее воздействие оказывается не только на благоприятные для авторов работ реакции разложения исходных продуктов, но и на реакции синтеза новых хлорсодержащих соединений. Прохождение таких реакций при температуре, соответствующей разложению хлорсодержащих соединений, описывается в ряде работ.

Более надежной считается непосредственная термическая (огневая) обработка хлорсодержащих загрязнителей ([36, 82, 83]). Отбросные газы нагревают до температуры, превышающей температуру самовоспламенения загрязняющих веществ. По результатам проведенных в [84] экспериментальных исследований, при температуре 1350°C и выше хлорсодержащие соединения в дымовых газах не обнаруживаются. Авторами [37] были проведены опытные работы по термообезвреживанию отбросных газов, содержащих метиленхлорид, дихлорэтан, хлороформ, четыреххлористый углерод, метан, водород, водяной пар, азот. По их результатам сделан вывод о надежном обезвреживании хлорсодержащих компонентов отбросных газов при температуре в печи 1120...1150°C и избытке воздуха $\alpha = 1,1...1,3$. Очевидно, в [84, 37] речь идет об исходных соединениях, т.к. даже при реально

недостижимом условии их полной окислительной конверсии продукты термообработки могут состоять из CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 , Cl_2 и HCl , т.е. будут содержать как минимум хлор и хлористый водород – токсичные и коррозионноактивные вещества.

Образующийся при термической обработке хлорсодержащих соединений HCl обычно стремятся извлечь из дымовых газов. Выбор способа улавливания хлористых соединений из продуктов сгорания считается важным фактором для всей схемы обезвреживания. Существующие схемы включают в себя комбинацию следующих методов: предварительная конденсация или сорбция хлорсодержащих компонентов выброса с целью возврата их в технологический процесс; термическая обработка выброса с остаточным количеством хлорсодержащих соединений; улавливание хлористого водорода из продуктов сгорания. Предложения по непосредственному сжиганию хлорсодержащих отходов в пламени, которые имеют место в патентной литературе, чаще всего относятся к сжиганию твердых хлорсодержащих отходов. Температура горения поддерживается в этом случае выше $1300^\circ C$. Для очистки предполагается организация непосредственного контакта дымовых газов с водой. В ряде работ предлагаются способы сжигания хлорсодержащих отходов с подачей в пламя водорода. Свободный хлор, образовавшийся при сжигании органических хлоридов, удаляют посредством взаимодействия с водородом, образовавшимся в результате подачи водяного пара и углеродсодержащего материала в пламя. Водород может инжектироваться непосредственно в дымовые газы, содержащие хлор, перед их охлаждением. При этом понижается содержание свободного хлора в продуктах сгорания. Инжектируемый водород должен иметь температуру от 450 до $1000^\circ C$. Удаление образовавшегося хлорида водорода осуществляется промывкой дымовых газов водой. Иногда предлагается совместное сжигание газообразных и жидких отходов с хлорированными углеводородами. Подача жидких отходов регулируется так, чтобы температура в зоне реакции находилась в пределах $1200...1500^\circ C$. В работе [38] предложены результаты исследований по сжиганию отходов производства трихлордифенила, пентахлорацетофенона и метилхлороформа. Опытно-промышленная установка по сжиганию отходов имела узел подготовки, циклонную печь, узел охлаждения и систему абсорбции хлористого водорода. Высота печи 900 мм, диаметр 370 мм. Время пребывания отходов в печи $0,2...0,4$ с. Температура продуктов сгорания на выходе из печи составляла $1100...1450^\circ C$. Содержание свободного хлора в продуктах сгорания находилось в пределах $0...2\%$ по объему, не превышая в большинстве опытов $0,01\%$. Содержание хлористого водорода составляло $5...7\%$ (об.). Химический недожог определялся не по степени конверсии исходных хлорсодержащих соединений, а по концентрации органически связанного хлора в продуктах сгорания, концентрация которого колебалась от 4 до 108 mg/m^3 . Установлено, что величина

химического недожога существенно зависит от температуры процесса. При температуре более 1400°C концентрация органически связанного хлора находилась в пределах 4...8 мг/м³. При снижении температуры на 100°C она возросла до 20 мг/м³, а при снижении на 250...300°C – до 60...100 мг/м³. В работе исследовались и условия, приводящие к синтезу фосгена при сжигании хлорсодержащих отходов. Температура в печи изменялась от 1050 до 1470°C, а коэффициент избытка выбросов α – от 1,2 до 1,5. Метод исследования позволял обнаруживать фосген с концентрациями до 0,25 мг/м³. Исследования показали, что при температуре более 1350°C фосген не обнаруживался. Авторы делают вывод, что при обеспечении соответствующих условий (температурных, гидродинамических, концентрационных, временных) можно достичь приемлемых значений концентраций фосгена, свободного и органически связанного хлора в продуктах сгорания, и создать экологически безопасную технологию огневого обезвреживания хлорсодержащих отходов.

Эффективность термообработки газов, содержащих чисто органические загрязнители, определяется полнотой их термоокисления, зависящей от температуры процесса, времени пребывания частиц загрязнителя и кислорода в зоне высоких температур, теплонапряжения топочного объема, параметров состояния и состава отбросных газов, физико-химических свойств загрязнителей ([85, 86]), ряда других факторов. Адекватное аналитическое описание этой чрезвычайно сложной зависимости в настоящее время отсутствует. Расчеты и проектирование установок термообезвреживания выполняются на эмпирической базе данных. Опыт обследования установок термообезвреживания показывает, что причиной низкой эффективности их работы часто становятся просчеты в подборе типов топочных и горелочных устройств, в определении коэффициента избытка выбросов, температурного уровня процесса и времени пребывания в реакционной зоне. Необходимо проведение исследований и разработки методики расчета, позволяющей определять реальные значения этих параметров для установок термообезвреживания, с учетом специфики процесса, отличающей его от сжигания стандартного топлива, а также общих недостатков, связанных с образованием в обоих процессах вредных компонентов выбросов.

В условиях термоокислительной обработки окислитель реагирует не только с загрязнителями, но в определенной степени и с отдельными компонентами инертной (безвредной) части выбросов. Продукты реакций с последними могут быть токсичными. В установках термообезвреживания, как и при сжигании газа в котлах и технологических печах, топливный и атмосферный азот частично окисляются до NO и NO₂. При этом выход NO_x, CO и др. образующихся токсичных соединений может регулироваться параметрами процесса, такими, как температура, давление, влажность в топке котла или печи ([87, 88, 89, 90, 91, 92]). В

то же время выброс загрязнителя глобального действия – диоксида углерода CO_2 , зависит в основном только от количества сжигаемого топлива и немного от его вида ([93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101]). При создании установок термообработки ранее принималось, что образование NO_x будет причинять меньший ущерб здоровью людей и окружающей среде, чем исходные загрязнители, а выброс CO_2 не учитывался вовсе. В последнее время такая позиция становится все менее убедительной при обосновании выбора термообезвреживания в качестве способа обработки отходов, что связано и с выполнением Россией с 2008г. международных обязательств и практической реализации положений Рамочной конвенции ООН об изменении климата (UN FCCC) и РКИК ООН по сокращению выбросов парниковых газов. Должны создаваться условия для выполнения обязательств, ввиду чего обработка производственных выбросов, содержащих парниковые газы с соединениями галогенов и диоксидом углерода, должна стать не только приоритетной, но и экономически прибыльной сферой деятельности.

Определение в таких условиях конкурентоспособности установок термообезвреживания, как и других газоиспользующих систем, может быть проведено по ([102]). Методика чувствительна к изменению коэффициента использования топлива и позволяет определить предел зоны риска капиталовложений при колебании цен на топливо. Приоритетным для нее является минимум затрат на топливо, что позволяет сделать выбор с учетом энергоэкономичности систем. Так как на единицу количества сжигаемого топлива, соответственно стехиометрической реакции окисления, выделяется строго определенное количество CO_2 ([103]), экономия энергии является также единственным действенным способом снижения его выброса.

Проведенный анализ показывает, что наиболее распространенным способом очистки выбросов от соединений галогенов является термическое обезвреживание. При этом существующие схемы являются достаточно сложными и дорогостоящими. Кроме того, как было отмечено выше, выбросы, содержащие такие загрязнители, принципиально не могут быть обезврежены путем термообработки. Поэтому требуется разработка оптимального сочетания нескольких способов очистки ([70]). Такая задача также рассматривается в последующих разделах.

1.3.6 Анализ способов очистной обработки выбросов с целью десульфуризации продуктов сгорания твердого топлива

Системами десульфуризации оборудуются ТЭС, работающие на угле, в США – по государственной программе Clean Coal Technology, а в странах ЕС – в соответствии с The Large Combustion Plant Directive (2001/80/EC). Последний документ является ориентиром и для

присоединившихся к ВТО европейских стран. При этом происходит планомерное ужесточение нормативов выбросов по всем направлениям потребления топлива, вплоть до судовых двигателей [104, 105]. В отчете Европейского агентства по окружающей среде от 14.03.2013 [104] отмечается увеличение за два последних десятилетия выброса вредных веществ в атмосферу всеми видами морского транспорта. Предлагается использовать для мониторинга выброса SO_2 в прибрежной зоне технику светового дистанционного зондирования и локации (LIDAR, Light Detection and Ranging), которая позволяет определять концентрацию SO_2 вдоль луча каждые 100...200 м на расстоянии от источника света до 2,5 км, с погрешностью не более 20%. Имеются образцы соответствующей техники, прошедшей испытания в Нидерландах. По данным Российского Морского Регистра судоходства, затраты по оборудованию вновь строящихся судов системами десульфуризации составляют порядка 160-170 \$ на 1 кВт установочной мощности судовых двигателей [105].

Цена оборудования системами десульфуризации стационарных энергетических установок в Европе находится приблизительно в тех же пределах. Так, на ТЭЦ Марица изток 2 (одна из четырех ТЭЦ юго-востока Болгарии, 8 блоков с номинальной мощностью 1450 МВт, после модернизации – 1600 МВт) 5 и 6 блоки суммарной мощностью 450 МВт, с целью приведения атмосферных выбросов в соответствие с болгарским законодательством и требованиями упомянутой директивы 2001/80/ЕС, были оборудованы в 2011 г. системами десульфуризации дымовых газов с эффективностью 94% [106]. Общая ориентировочная стоимость проекта составила более 80 млн. € [107] при том, что устройство трубы высотой 135 м из стеклопластика типа GRP ощутимо удешевило проект по сравнению с железобетоном. Работа выполнялась по линии грантов ЕБРР и частично на собственные средства. Очевидно, что даже небедным предприятиям оснащение современными системами десульфуризации неподъемно. Поэтому создание инноваций, направленных на упрощение подобных систем при сохранении эффективности очистки, весьма востребовано, а прорывных технологий в этой области пока не наблюдается.

С первой половины прошлого века по настоящее время десульфуризация, в т.ч. удаление сернистого газа SO_2 из продуктов сгорания топлива, проводится сухими, полусухими и мокрыми методами. Наиболее прогрессивной считается мокрая обработка, или отмывка, газов. Неочищенные продукты сгорания после парогенераторов ТЭС подаются в абсорберы, где происходит их контакт с известковым молоком. Однако при такой обработке испаряется достаточно большое количество воды, а дымовой газ остывает. После этого очищенный газ снова необходимо нагревать до 150-200 °С, и лишь затем можно направлять в дымовую трубу. Сухая аддитивная очистка с подачей в топку котла пылевидного известняка вместе с угольной

пылью считается наиболее простым и наименее эффективным способом. В топке происходит термическая диссоциация известняка CaCO_3 с образованием негашеной извести CaO и диоксида углерода CO_2 . Затем CaO связывает находящийся в газовой фазе диоксид серы SO_2 , образовавшийся при сгорании пылевидного топлива, а продукт реакции - сульфит кальция CaSO_3 , улавливается далее вместе с золой.

Очевидно, обеспечить эффективность сухой очистки в таком виде весьма сложно. Одна из причин – в ограничении полноты гетерогенной реакции связывания загрязнителя



временем пребывания реагентов в топке, которое составляет порядка нескольких секунд. Единственная реальная возможность достижения в таких условиях сколько-либо приемлемого эффекта – подача известняка с большим избытком по отношению к стехиометрии реакций очистки, что пропорционально увеличивает и выброс CO_2 . По данным расчетных нормативов Украины [108], коэффициент избытка известняка принимается порядка 2,25, а эффективность десульфуризации $\eta = 50\%$, тогда как для мокрой известняковой очистки достигает 94%. По данным этих же авторов, дополнительный выброс CO_2 , т/т SO_2 , составляет около 6,5 при сухой аддитивной и 1,5 при мокрой очистке.

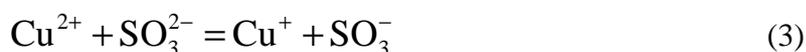
Между тем по программе Clean Coal Technology в США разрабатываются способы газификации сжигаемого угля непосредственно в слое (в т.ч., по данным Института теплофизики СО РАН [109] – циркулирующем). Очевидно, при наличии присадок в слое параллельно могли бы идти и процессы десульфуризации, что позволило бы увеличить время пребывания SO_2 и CaCO_3 в реакционной зоне и существенно уменьшить избыток присадки [110]. С этой позиции эффективность сухой аддитивной очистки в неподвижном слое топлива с присадками в принципе могла бы быть доведена за счет увеличения времени пребывания реагентов и до показателей мокрой очистки.

Однако здесь необходимо еще проанализировать влияние условия ограничения пространства для реагентов в слое на эффективность процесса связывания SO_2 при помощи таких реакций. Акад. Н.Н. Семенов в работе [111] показал, что кинетическое поведение реакции окисления сульфита напоминает окисление жидких и газообразных альдегидов и непредельных углеводородов. На цепной механизм указывает фотохимическое ускорение реакции под облучением ультрафиолетовым светом. Определенный Н.Н. Семеновым квантовый выход фотохимически ускоренной реакции оказался порядка 50000 окисленных молекул на квант ультрафиолетового облучения, т.е. здесь имеет место реакция с очень длинными цепями.

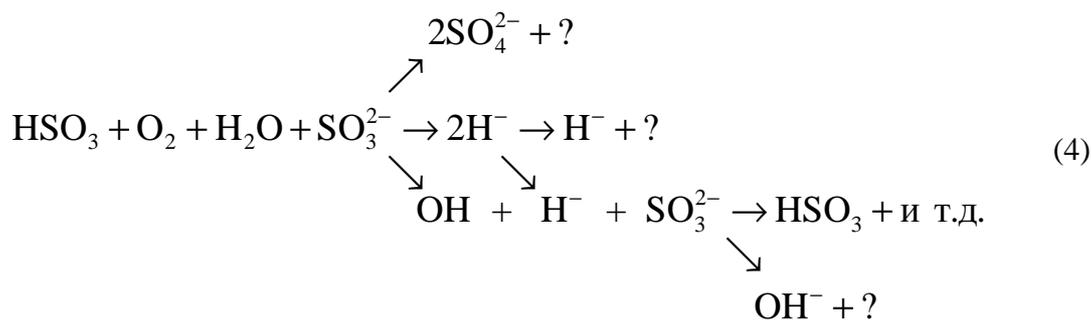
Наличие цепного механизма прослеживается и по уменьшению скорости реакции в присутствии даже ничтожных следов ингибиторов (по Н.Н. Семенову – отрицательных катализаторов) радикальных реакций. Задерживающее действие ингибиторов, которые все являются легко окисляющимися веществами, связано с обрывом цепей из-за реакции окисления их молекул активными центрами. Опытным путем установлено, что молекулы спиртов окисляются при этом до кетонов или альдегидов, а скорость такой реакции напрямую коррелирует со скоростью задержки основной реакции. В работе отмечено также, что термическая и фотохимическая реакции окисления сульфита отличаются только механизмом зарождения активных центров. Развитие же цепи в обоих случаях происходит одинаково. По Ф. Габеру (Haber, F, 1931; цит. по [111]), цепи начинаются с образования гипотетических молекул моноионовой кислоты HSO_3 из активных центров – одновалентных ионов SO_3^- , которые, в свою очередь, образуются из теряющих один электрон двухвалентных ионов SO_3^{2-} :



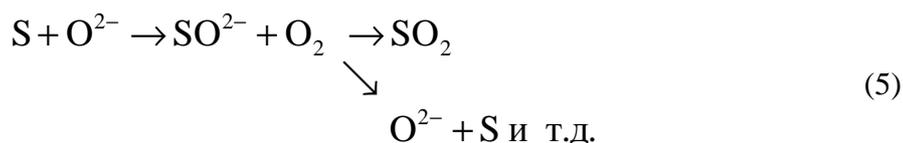
Эта стадия при обычной температуре и без облучения может идти в присутствии катализаторов, например, двухвалентных ионов меди:



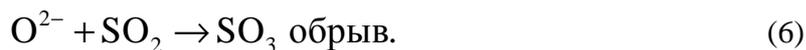
Дальнейшее развитие цепи:



При слоевом сжигании топлива исходным материалом для ионов SO_3^{2-} могут стать диоксид SO_2 (оксид серы IV, сернистый ангидрид) и триоксид SO_3 (оксид серы VI, серный ангидрид), поступающие в газовую фазу зоны горения следующим образом. В пламени сера и ее соединения успевают окислиться в основном до SO_2 :



Реакция окисления (V) цепная неразветвленная. В отдельных случаях происходит полное окисление серы до SO_3 , приводящее к обрыву цепей:



В целом схема реакций связывания элементарной и органической серы, топлива, сжигаемого в слое, предполагает гетерогенную стадию, лимитирующим процессом которой будет диффузия кислорода к поверхности частиц слоя топлива, гомогенную стадию с реакциями (2, 4, 5, 6) и гетерогенной каталитической ступенью (3), и затем вновь гетерогенную стадию по реакции (1). Можно видеть, что уменьшение размеров частиц топлива в слое приведет к ускорению гетерогенных стадий разложения серосодержащих соединений за счет увеличения общей площади поверхности и по той же причине затормозит гомогенные цепные реакции (2, 4, 5) непосредственно у поверхности. В результате продукты разложения сераорганических компонентов угля будут окисляться уже в газовой фазе, где присадок, связывающих сернистый ангидрид, нет. Поэтому с позиции обеспечения условий прохождения гетерогенных и гомогенных цепных реакций связывание серы в слое не представляется оптимальным решением.

Десульфуризация в слое с присадками неэффективна еще из-за влияния на процесс структурных изменений в слое, происходящих при сгорании органической части и консолидации зольного остатка угля. Исследования, проведенные еще в довоенные годы посредством микрофильмирования горячей поверхности различных веществ ([112]), показали, что даже у малозольных топлив поверхность зеркала горения покрывается рыхлым слоем минерального остатка, затрудняющим диффузию кислорода к поверхности, а продуктов газификации угля – от поверхности. При высокой же зольности на ней образуется твердая или жидкая оболочка, нарушающая газопроницаемость зеркала горения и резко увеличивающая сопротивление диффузионному переносу в слое. Более поздние исследования по горению самых различных веществ [113, 114], в частности, металлов, смесевых твердых топлив, полимерных материалов, также подтверждают результаты этих наблюдений.

Итак, существенным преимуществом организации процесса десульфуризации в слое с присадками перед десульфуризацией в потоке является возможность обеспечения требуемой

длительности совместного пребывания реагентов. Однако из-за ингибирования цепных реакций поверхностью частиц топлива и нарушения контакта реагентов из-за ее ошлакования, отмеченное преимущество сходит на нет. Обратим внимание на то, что оба недостатка десульфуризации в неподвижном слое – ошлакование поверхности и ингибирование ею реакций, перестают быть существенными при десульфуризации в потоке, хотя удельная поверхность пылевидного угля значительно выше, чем дробленого. Однако относительное расстояние между частицами в потоке значительно больше, чем в слое. Увеличение же относительного пространства ведет к уменьшению числа обрывов цепей и снижению скорости гибели активных центров на поверхности. Из-за постоянного обдувания частицы угольной пыли в потоке меньше сказывается на диффузионном переносе и влияние структурных изменений при ее сгорании. Однако, как уже отмечалось, при проведении процесса в потоке время пребывания SO_2 и CaCO_3 в реакционной зоне лимитируется внутренними размерами топки котлоагрегата, рассчитанными на обеспечение полноты сгорания топлива, а не десульфуризации. Оптимальным режимом, имеющим преимущества проведения десульфуризации в потоке и слое, и при этом не включающим недостатки одного и другого, представляется фонтанирующий слой. Организация процесса в фонтанирующем режиме может обеспечить достижение практически любого требуемого времени пребывания частиц топлива и присадки в реакционной зоне так же, как в неподвижном слое, но без непосредственного контакта между частицами топлива и с их постоянной обдувкой газовой средой, как при десульфуризации в потоке. Наличие максимально развитой (по сравнению с неподвижным и псевдооживленным слоями) поверхности массообмена фонтанирующего слоя позволяет превзойти показатели мокрой очистки процесса десульфуризации.

Итак, проведенный анализ свидетельствует о том, что в отечественной и зарубежной практике наиболее прогрессивным методом десульфуризации выбросов считается отмывка газов, применяемая с начала прошлого века. В современном оформлении системы десульфуризации весьма накладны для генерирующих предприятий, и в ЕС ими оснащаются только при условии выделения субсидий Брюсселем и ЕБРР. Поэтому создание инноваций, направленных на упрощение подобных систем при сохранении эффективности очистки, весьма востребовано, а прорывных технологий в этой области пока не наблюдается. С позиции организации и поддержания оптимальных физико-химических параметров очистки здесь наиболее удобны процессы сухой десульфуризации в фонтанирующем слое, однако подобные способы пока не реализуются. Пути преодоления ряда сдерживающих это направление причин исследуются в данной работе.

Выводы по главе 1

Сравнительный анализ теоретической базы существующих методов оценки и совершенствования очистной обработки газоздушных потоков и выбросов производственных помещений позволил выявить круг основных задач, которые должны быть решены для создания оптимальных систем защиты окружающей среды, соответствующих современным требованиям, в т.ч. по парниковым газам. Разработка научно обоснованных показателей оценки, обеспечивающих объективный и прозрачный отбор направлений совершенствования на узлах и агрегатов пылегазоочистных систем ТЭС, является весьма актуальной задачей.

Проведенный анализ показал необходимость разработки максимально простых показателей, позволяющих объективно оценивать совершенство средств обезвреживания и условий их эксплуатации по всем загрязнителям, в т.ч. по парниковым газам. На настоящее время научно обоснованных комплексных методов оценки энергетического, экологического и гигиенического совершенства газоочистных устройств нет. Оценка усовершенствованных систем только по ПДВ служит лишь показателем выполнения задания на конструкторскую разработку, т.к. его можно достичь разными средствами. Возможно определенное повышение точности расчета самой величины ПДВ на основе современных программ вычислительной гидроаэродинамики (*Computational Fluid Dynamics - CFD*). Здесь перспективно численное моделирование с целью уточнения высоты начального подъема примеси над источником выбросов ΔH и эффективной высоты выброса H_e .

Оценки очистных аппаратов по степени обезвреживания выброса могут характеризовать интенсивность процессов в них, но имеют малую экологическую или санитарно-гигиеническую ценность. Их формальное применение для способов обработки, связанных с химическими превращениями загрязнителей, может привести к грубым ошибкам и обернуться тяжелыми последствиями, поскольку продукты реакции, как правило, не безвредны, а иногда более токсичны, чем исходные компоненты.

Оценка способов очистки гетерогенных выбросов показала перспективность поиска сочетания оптимальных параметров вихревой сепарации и фильтрации. Теоретическая база совершенствования указанных устройств разработана недостаточно. Непротиворечивой физико-математической модели осаждения частиц на стационарном фильтрующем слое в теории фильтрации пока не создано. Поскольку на фильтрацию затрачивается значительное количество энергии, то создание теоретически обоснованных методик представляет и практический интерес. Перспективна разработка способов совершенствования систем инерционной очистки и фильтрации с использованием безразмерных комплексных характеристик и соотношений, полученных из численного эксперимента на основе

современных программных продуктов на базе *CFD*. Для этого необходима отработка схем численных экспериментов по сепарации частиц из потока при обтекании препятствий малого диаметра. Необходимо также уточнение критериальных параметров для случая сепарации частиц из криволинейных потоков, т.к. безразмерный комплекс Stk содержит характеристики только прямолинейного движения. Строго теоретически в криволинейных каналах он может адекватно отражать процесс осаждения только при движении мультифазных потоков с радиусами кривизны $R \rightarrow \infty$, а для конечных значений R – в стоксовской области движения.

В теории фильтрации, для объективной оценки вклада и обоснованного учета существенных видов взаимодействий при захвате частиц препятствием, необходимо определение сил и энергии взаимодействия поверхностей частицы и препятствия, с использованием элементов квантовой механики для оценки действия вандерваальсовых сил.

Некоторые гомогенные загрязнители глобального действия, включенных в списки ООН как влияющие на озоновый слой, стойкие органические загрязнители и парниковые газы, представляют соединения галогенов. Нередко их рекомендуют уничтожать путем обработки в топливоиспользующих системах. Анализ работы систем обработки выбросов конденсацией, сорбцией или термоокислением позволил выявить их основные недостатки. Требование учета парникового эффекта заметно ограничивает применимость существующих топливоиспользующих систем очистки вследствие выброса CO_2 . В дополнение к этому, непосредственная термообработка галогенсодержащих парниковых газов приводит к образованию промежуточных высокотоксичных веществ, обладающих и парниковым эффектом. Вместе с тем, из всех употребительных на практике средств защиты окружающей среды системы с конденсационной, адсорбционной и термической обработкой наиболее надежны. При комплексном применении они могут охватить в совокупности максимально возможное число видов загрязнителей. Для создания оптимальных схем очистной обработки галогенсодержащих газовоздушных потоков производственных объектов с научным обоснованием направлений их совершенствования необходимы теоретические, численные и натурные исследования комплексных систем конденсационной, адсорбционной и термической обработки (в т.ч. с использованием элементов фундаментальных наук, методов *CFD* и современных экспериментальных средств), что принимается в качестве одной из ключевых задач данной работы.

2 Теоретические основы совершенствования конструирования систем очистки выбросов теплоэнергетических объектов в соответствии с современными нормативами

2.1 Совершенствование оценок эффективности систем очистки выбросов от производственных объектов генерирующих предприятий

2.1.1 Санитарно – гигиенические оценки соответствия неизотермических выбросов из высоких источников (дымовых труб ТЭС)

Проведенный в предыдущих разделах анализ принципов и методов оценки газоочистных систем показывает, что коэффициенты очистки могут служить показателями интенсивности процессов, идущих в аппаратах газоочистки, но имеют малую экологическую или санитарно-гигиеническую информативность. Комплексных показателей энергетического и экологического или санитарно-гигиенического совершенства аппаратов обезвреживания, учитывающих наличие загрязнителей глобального действия, пока нет. Проанализируем обоснованность существующих показателей, используемых в настоящее время при конструировании, проектировании и контроле очистных сооружений.

В соответствии с Федеральным законом №7-ФЗ [40, ст. 38 п.2], ввод в эксплуатацию зданий, строений, сооружений и иных объектов, не оснащенных техническими средствами и технологиями обезвреживания выбросов загрязняющих веществ, обеспечивающими выполнение установленных требований в области охраны окружающей среды, запрещается. Далее в ст. 39, п. 2 [40] юридическим и физическим лицам, осуществляющим эксплуатацию зданий, строений, сооружений и иных объектов, Законом предписывается обеспечивать соблюдение нормативов качества окружающей среды на основе применения технических средств и технологий обезвреживания выбросов в соответствии с законодательством.

Следовательно, в качестве показателя работы очистных устройств Законом [40] подразумевается ПДВ. Через него предполагается учет экологического, а через его зависимость от ПДК – санитарно-гигиенического совершенства аппарата газоочистки. Других показателей совершенства устройств очистки выбросов в Законе [40] не предусмотрено.

Здесь необходимо отметить, что природоохранным отношениям с энергетическими объектами в Законе [40] отведена отдельная статья 40 «Требования в области охраны окружающей среды при размещении, проектировании, строительстве, реконструкции, вводе в эксплуатацию и эксплуатации объектов энергетики». В п.2 статьи 40 предписывается оснащать тепловые электростанции при проектировании и строительстве высокоэффективными средствами очистки выбросов загрязняющих веществ и использовать экологически безопасные

виды топлива. При этом в соответствии с п. 1 ст. 40 требования к выбросам объектов энергетики также регламентируются рассмотренными выше статьями 38, 39.

Вместе с тем очевидно, что величина ПДВ не отражает технического совершенства очистных устройств. Разные устройства обеспечивают одинаковый выброс с различными материальными и энергетическими затратами. В случае выброса нескольких загрязнителей разнонаправленного действия, или трансформации исходных веществ в процессе очистки, ПДВ неинформативен и как экологический показатель: это унитарная величина, привязанная к выбранному в качестве основного конкретному загрязнителю. Поэтому оценка по ПДВ может показать совершенство аппарата по очистке выбросов с одним нетрансформирующимся загрязнителем. А вследствие недостаточной детерминированности с ПДК затруднительно оценивать по ПДВ и санитарно-гигиеническое совершенство очистного устройства. Поэтому практика санитарно-гигиенического и экологического мониторинга загрязнения воздушного бассейна базируется в основном на приборных замерах, а не на расчетных данных от ПДВ.

Совершенствование нормативов предельно допустимых вредных воздействий по мере развития науки и техники, предусмотренное в [40], очевидно, невозможно без развития науки и техники газоочистки. Для определения направлений ее развития, оценки эффективности усовершенствованной техники и эксплуатации газоочистного оборудования в России принято использовать такой показатель, как степень очистки выбросов. Она определяется по результатам очистки опытным путем посредством замеров ряда необходимых параметров загрязненного и очищенного газов – концентраций, дисперсного состава загрязнителей, физических параметров потока выбросов [115]. Однако степень очистки не дает возможности оценить экологическое или санитарно-гигиеническое совершенство аппаратов очистки. По [116], конечная концентрация сама по себе еще ничего не говорит об опасности продуктов, выбрасываемых в окружающую среду, хотя этот момент не так уж очевиден. В США, к примеру, и санитарный контроль, и контроль эффективности работы установок, ведутся только по конечным концентрациям загрязнителей в выбросах [43], приводимым к одной степени разбавления незагрязненным воздухом. С одной стороны, это позволяет создать жесткую и прозрачную систему контроля за источниками выбросов, а с другой – не стимулирует развитие техники газоочистки и не способствует снижению загрязнения атмосферы какими-либо загрязнителями, кроме контролируемых. Очистка гомогенных загрязнителей обязательно основывается на каких-либо особенностях физико-химических свойств, отличающих их от инертной части выбросов. Устройство, разработанное для одного конкретного вещества, может быть эффективно применено к небольшой группе сходных по свойствам соединений, а число химических веществ, выбрасываемых в атмосферу, превышает 0,5 млн.

Для оценки эффективности проводимых природоохранных мероприятий в рамках Единой системы государственного мониторинга окружающей среды (ст. 63.1, п.4 [40]) и их совершенствования необходимы комплексные показатели систем очистки, отражающие техническое (в первую очередь – энергетическое), экологическое и санитарно-техническое совершенство очистных устройств, учитывающие также международные стандарты. Существует множество подходов к комплексному определению эффективности газоочистных систем. Оценочные показатели создаются по одному из двух методов: экспертных оценок [117], или некоторого сочетания показателей эффективности, определяемых по тому или иному набору конкретных результатов работы очистного устройства. Оба метода несвободны от субъективизма и развиваются в направлении его преодоления.

Для второго метода это направление, как правило, характеризуется увеличением числа показателей. Судя по доступной отечественной литературе, их максимальное количество собрано, по-видимому, в интегральном инженерно-экологическом показателе η_0 ([118]), составленном из 7 сомножителей (воздействие на водную и воздушную среду; шумовое воздействие; увеличение энергозатрат, материалоемкости и затрат на обслуживание по сравнению с системами провентилиации; занятость производственных площадей под очистные устройства), и включенном в эколого-экономический показатель. Очевидно, что произведение семи-восьми биномов типа $(W_2 - W_1)/W_2$ (W_1 – выброс загрязнителя после очистного устройства или затраты на очистку; W_2 – поступление загрязнителя на очистку или общие затраты на функционирование объекта), даст множество интерференционных (перекрестных) членов 2...8 порядков, смысл которых, как и смысл их суммы, не всегда будет адекватно определимым. При этом в приведенном наборе по [118] представлены далеко не все показатели, имеющие значение для процесса очистки выбросов. Чтобы составить объективный абсолютный показатель путем увеличения числа частных показателей, потребовалось бы выявить реальный вклад частных показателей в создание оптимальной ситуации для очистного аппарата на конкретном производстве с учетом технологических, экологических, санитарно-гигиенических, а также экономических, климатических, социальных и др. факторов. Допуская возможность объективного учета нескольких десятков факторов и решения многофакторной оптимизационной задачи, легко предвидеть, что результат окажется не универсальным, а жестко привязанным к климату, форме собственности, загрязненности региона строительства, типу и организации эксплуатации производства, очистной системы и т.д. [119]

Вместе с тем возможно и необходимо создание приоритетных показателей не тотального, а комплексного характера, которые могут быть использованы в конкретных ситуациях. Подобного подхода придерживаются авторы [44, 120, 121, 122,]. В частности,

отмечается, что в процессах, где изменяется природа и токсичность обрабатываемых соединений, степень очистки, определенная по начальной и конечной концентрации загрязнителя, не может быть показателем эффективности работы очистного устройства.

К этому необходимо добавить, что такая степень очистки не является показателем очистки и для выбросов с несколькими (пусть даже сохраняющими при обработке исходные свойства) загрязнителями, что более типично для реальных производственных условий. При конструировании очистных систем и определении режимов их работы приходится, по сути, произвольно, выбирать один из загрязнителей в качестве основного. Режимные параметры, рассчитанные по загрязнителю с максимальной токсичностью или концентрацией, не всегда смогут обеспечить достаточное обезвреживание других ингредиентов. Реальные выбросы характеризуются крайне неравномерным поступлением выбросов и их ингредиентов в течении технологического цикла. При множестве возможных сочетаний токсичности, концентраций, расходов загрязнителей, оптимальные параметры обработки для которых могут существенно различаться, энергетически более затратным может оказаться обезвреживание компонента, не принятого за расчетный.

В [44, 123, 124, 125, 126] отмечается отсутствие показателя оценки санитарной эффективности очистных систем. Авторы [44] предлагают использовать для санитарно-гигиенической оценки очистных сооружений комплексный показатель «санитарной эффективности» СЭ, составленный как произведение степени очистки η и показателя «контроля биосферы» КБ= $C_e/\text{ПДК}$:

$$\text{СЭ} = \eta/\text{КБ} = (1 - C_e/C_b)(\text{ПДК}/C_e), \quad (2.1)$$

где C_b, C_e – начальная и конечная концентрации загрязнителя, мг/м³.

Показатель СЭ принят в нашей работе за аналог. При усовершенствовании было учтено, что в представленном в (2.1) виде он не совсем удобен для оценок санитарной эффективности работы систем газоочистки. Так, численное значение показателя КБ, как правило, на 2-3 порядка меньше, чем η , а показатели КБ разных загрязнителей одного выброса отличаются на несколько порядков. Поэтому в комплексе СЭ нивелируется различие очистных устройств по степени очистки η , и еще усложняется оценка очистки выбросов с несколькими загрязнителями. Рекомендации оценивать в этом случае эффективность обезвреживания по наименьшему СЭ из рассчитанных для каждого соединения, ввиду множества возможных сочетаний концентраций и параметров обработки загрязнителей, могут часто оказываться неприменимыми.

Недостатком показателя СЭ является также некоторая алгебраическая несогласованность. Представим его как

$$\text{СЭ} = (1 - C_e/C_b)(\text{ПДК} \cdot W/\text{ПДВ}), \quad (2.2)$$

где W – интенсивность выброса, $\text{м}^3/\text{с}$.

Согласно (2.2), СЭ растет пропорционально интенсивности выброса, что позволяет увеличивать показатель, не совершенствуя очистное устройство: при разбавлении выброса чистым воздухом увеличивается W и уменьшается C_e . В комплексном показателе эффективности было бы полезно отразить экологическую составляющую, учитывающую ухудшение качества атмосферы. Выброс загрязнителя очистным сооружением сопровождается ущербом в виде потери ее чистоты, на восстановление которой требуется затрата определенного количества энергетических и материальных ресурсов.

Для сравнительной экспертной оценки потери качества выбрана величина контрольного объема области атмосферы V , м^3 , на чистоту воздуха которой оказывают существенное влияние выбросы рассматриваемого источника, условно ограниченная цилиндром с характерными значениями высоты и диаметра ([127]). Характерной высотой цилиндра служит эффективная высота источника по (1.8). За характерный диаметр принято расстояние по горизонтали x_M от основания источника до точки на поверхности, в которой при «опасной» скорости ветра u_M достигается максимальная концентрация C_M , которая не должна превосходить ПДК_{мр}. Таким образом,

$$V = \pi x_M^2 \cdot H_e / 4 = \pi x_M^2 (H + \Delta H) / 4. \quad (2.3)$$

Характерным параметром действия, выражающегося в ухудшении качества атмосферы, заключенной в данной области объемом V , м^3 , является время его заполнения загрязнителем τ_1 , с, до значения ПДК_{мр} при ПДВ [128]:

$$\tau_1 = \text{ПДК} \cdot V / \text{ПДВ} = \text{ПДК} \cdot V / (C_e \cdot W) = \tau_2 \cdot \text{ПДК} / C_e, \quad (2.4)$$

где τ_2 – время заполнения объема V , м^3 , выбросом интенсивностью W , $\text{м}^3/\text{с}$.

Для однозначности оценочных расчетов удобно принять за масштаб характерных временных параметров τ_1 и τ_2 постоянную величину, в качестве которой, основываясь на рекомендациях ряда исследователей, в т.ч. [129], используем период осреднения концентраций загрязнителей $\tau_0 = 1200$ с, численно равный времени отбора проб при контроле ПДК_{мр}. Относя к нему параметры τ_1 , τ_2 , получим безразмерные временные параметры ухудшения качества атмосферы вследствие выброса загрязнителя очистным сооружением T_1 , T_2 , которые можно использовать для характеристики санитарно-гигиенического и экологического, а в сочетании со степенью очистки – и технического совершенства газоочистных систем:

$$\eta = (1 - C_e/C_b)T_1 = (1 - C_e/C_b)T_2 \cdot \text{ПДК}/C_e. \quad (2.5)$$

Полученный комплекс отличается дополнительным учетом параметра T_2 , устраняющего алгебраическую несогласованность СЭ: повышение интенсивности выброса W сокращает значение T_2 и снижает эффективность очистной установки η_{cln} . Ввиду того, что T_2 по величине имеет 3...4 порядок, T_1 сравнивается по порядку величины со степенью очистки. Этим устраняется еще один отмеченный недостаток комплекса СЭ, заключающийся в нивелировании различия очистных устройств по степени очистки.

Для практического применения представленного по (2.5) показателя необходимо определение значений ΔH и x_M . В [54] предлагается ориентировочно определять x_M в пределах 15...25 H , а ΔH – из (1.9). возможно развитие этого выражения с актуализацией характеристик на основе численных расчетов рассеивания гомогенных загрязнителей с использованием современных программных продуктов, реализующих методы *CFD*.

2.1.2 Оценка энергоэкологической эффективности систем очистки выбросов с парниковыми газами

Для объективной оценки экологического совершенства средств очистки с учетом выброса парниковых газов необходимо представить эффективность установки в виде безразмерной затраты энергии на восстановление качества окружающей среды – энергоэкологического коэффициента полезного действия *EER*. С этой позиции за аналог принят энергоэкологический показатель А.Л. Шкаровского, представленный в [130]. Отличие в том, что этот показатель рассматривается А.Л. Шкаровским применительно к состоянию окружающей среды в глобальных масштабах, а в данном исследовании энергоэкологический показатель адаптируется к местным системам очистки для источников выброса локального характера, но при наличии загрязнителей глобального действия (например, ОРВ и/или ПГ). При этом в нашей работе подобный показатель использован с целью обеспечения объективности оценки совершенства газоочистных систем [131].

Очевидным недостатком оценки эффективности очистных систем по степени очистки отдельных загрязнителей является произвол в определении компонента, по которому они должны оцениваться. Изначально дать точную оценку величины наносимого вредными веществами ущерба проблематично. Затруднения начинаются уже с неоднозначности определения того, что следует считать загрязнителями, а для ряда веществ, признанных

такowymi в последнее время, проблему усугубляет отсутствие количественных характеристик наносимого ущерба. При этом для оценки воздействия на окружающую среду таких компонентов выбросов, как «парниковые» газы, из которых в выбросах промышленных теплоисточников и тепловых технологических установок всегда присутствует CO_2 , не однозначен и качественный показатель. После подписания в 2004 г. Россией РКИК ООН он вступил в 2005г. в силу, и на территории РФ с 2008 г. начато выполнение обязательств по нему. В частности, создан предусмотренный протоколом реестр выбросов и проводится отчетность по нему. В то же время в России пока мало заметны действия в направлениях, которые могут принести определенную выгоду – например, в направлении предусмотренной протоколом же постепенной замены существующего очистного оборудования на более совершенное оборудование с точки зрения выброса «парниковых» газов. В рамках РКИК ООН разработаны и реально действуют механизмы («механизмы гибкости»), позволяющие проводить такую замену. Однако число проектов, выполняемых по ним в России, исчисляется лишь единицами, хотя в последнее время появились документы, определяющие порядок этой деятельности. Одна из ряда причин задержек заключается в отсутствии объективных показателей для оценки совершенства очистных устройств при наличии парниковых газов. Разработка действенных регламентирующих документов на законодательном уровне должна базироваться на теоретически обоснованных показателях, которые позволили бы исключить произвол и обеспечить единый подход к оценке различных типов систем по выбросу «парниковых» газов.

Методика оценки должна быть при этом по возможности простой, иметь прозрачный алгоритм вычислений с ясными, однозначными и легко определяемыми параметрами. В целях количественной оценки экологического совершенства очистных устройств по парниковым газам представляется оптимальным использовать энергоэкологический показатель в виде безразмерной затраты энергии на гипотетическое предотвращение выброса CO_2 указанными системами в атмосферу планеты. Он может быть определен из сопоставления энергозатрат, необходимых для удаления CO_2 и H_2O из состава исследуемых выбросов и некоторых эталонных газов до идеальной концентрации, соответствующей среднему фоновому содержанию в незагрязненной атмосфере CO_2 (порядка 0,03% об.).

Для корректности энергоэкологический показатель должен определяться по процессу удаления CO_2 и H_2O из состава выбросов, имеющему минимальные затраты энергии. Это необходимо для упрощения алгоритма сравнения очистных устройств разных типов и достижения однозначности результата, т.к. с уменьшением общих затрат растет доля затраты энергии непосредственно на очистку и снижается доля второстепенных затрат. Оценка энергозатрат возможных способов удаления парниковых газов из состава выбросов и выбор

процесса с минимальными затратами в качестве эталонного необходимо провести по CO_2 . Следует заметить, что в данном исследовании энергозатраты на предотвращение выброса CO_2 очистным оборудованием оцениваются гипотетически, без постановки вопроса о необходимости или целесообразности такого действия.

В условиях, близких к нормальным, наиболее эффективно удаление CO_2 при помощи химической абсорбции, однако доля прямых энергозатрат процесса однозначно не определяется. Точный учет энергозатрат, непосредственно сопутствующих очистке (на производство реагентов, десорбцию, сброс отходов) не представляется возможным.

Процесс физической абсорбции интенсивен только при высокой концентрации сорбируемого вещества и высоком давлении в аппарате. Несмотря на хорошую растворимость CO_2 , для обеспечения достаточной движущей силы в абсорберах поддерживают давление от 1,5 МПа и более ([132]). Для обеспечения фонового содержания CO_2 потребуется повысить давление на 3 порядка – до $1,5 \cdot 10^3$ МПа, т.е. ориентировочные энергозатраты для этого составят не менее $1,5 \cdot 10^3$ МДж на 1 м^3 выбросов.

Нецелесообразно принимать за эталонный процесс улавливания CO_2 и адсорбцию. Затраты на создание необходимого в этом случае высокого давления намного превосходят энергозатраты на сорбцию. Дополнительно приходится учитывать затраты энергии на подачу и регенерацию сорбента, устанавливать энергетический эквивалент его стоимости, т.к. для выбросов с различными начальными концентрациями CO_2 требуется разное количество сорбента. Это вносит неоднозначность в оценочный показатель.

Последняя проблема автоматически исключается, если принять за эталонный процесс конденсацию CO_2 . Затраты выражаются в виде тепловой энергии, непосредственно отводимой при охлаждении газов и/или создании требуемого давления. Учет различия начальных концентраций CO_2 в выбросах может быть также выражен при необходимости чисто через энергозатраты на изменение скорости подачи хладоносителя, циркулирующего в системе, при его неизменном количестве. Для расчетов в области параметров работы очистных систем существенно и то, что процессы массопереноса в адсорберах и абсорберах исследованы в основном для технологических режимов, в области высоких концентраций улавливаемых веществ. Исследования сорбции в области концентраций улавливаемых веществ, близких к равновесным (при небольшой движущей силе) практически отсутствуют, по причине энергетической невыгодности таких режимов для процесса производства. Расчетные зависимости, полученные при большой движущей силе, дают, как правило, в области концентраций, близких к равновесным, чересчур оптимистичные результаты. Это снижает объективность полученных на их основе оценочных показателей. В то же время эмпирические

зависимости, используемые в конструктивных и поверочных расчетах конденсационных установок, могут быть использованы и при невысоких концентрациях загрязнителей. Причина в том, что температурный потенциал и движущая сила процесса теплопередачи не зависят непосредственно от концентрации загрязнителя так, как зависят потенциал и движущая сила массопередачи. Поэтому из всех возможных способов удаления CO_2 наиболее удобно и однозначно определение энергозатрат по методу конденсации.

Вместе с тем процесс конденсации CO_2 может проводиться двояко – с переводом в жидкую или твердую фазу. Чистый газообразный CO_2 может быть переведен в жидкую фазу при комнатной температуре и давлении около 5,5 МПа. Здесь исключаются энергозатраты на отвод тепла при охлаждении выбросов. Однако перевод CO_2 в жидкую фазу при его концентрации в выбросах $\sim 0,05\%$ потребует создания давления порядка $(5,5) \cdot 2 \cdot 10^3$ МПа, т.е. энергозатраты оказываются в 10 раз выше, чем при абсорбции. При 100%-ной концентрации CO_2 в выбросах он может быть переведен в жидкую фазу при $\sim 0,53$ МПа и температуре 216,5 К. Для конденсации фоновой концентрации потребуется давление порядка $(0,53) \cdot 2 \cdot 10^3$ МПа, т.е. энергозатраты в 1,5 раза ниже, чем при абсорбции. Хотя, как было упомянуто, техническая или экономическая целесообразность применения процесса не рассматривается, необходимо подобрать в качестве эталонного способ с минимумом энергозатрат. Оценочный показатель на основе способа с высокими энергозатратами ставит в худшие условия очистные системы с меньшей начальной концентрацией CO_2 в обрабатываемых выбросах. Затраты энергии на создание давления существенно больше затрат на конденсацию CO_2 , и их различие будет нивелироваться величиной общих энергозатрат.

Необходимо оценить также энергозатраты при сублимации CO_2 (конденсации из газовой фазы в твердую). Возможен переход CO_2 в твердое состояние при постоянном (атмосферном) давлении со снижением температуры конденсации и при постоянной температуре с изменяющимся (растущим) давлением. Чистый пар CO_2 сублимирует при 194,7 К и атмосферном давлении. Для конденсации CO_2 при 194,7 К из выбросов с концентрацией, близкой к фоновой, потребуется давление порядка $(0,101325) \cdot 2 \cdot 10^3$ МПа, т.е. энергозатраты ниже, чем при абсорбции и переходе CO_2 в жидкую фазу, в 7,5 и 5 раз. Энергозатраты последнего способа составят ~ 202 МДж/м³ без учета затрат на отвод тепла от отбросных газов при охлаждении выбросов до 194,7 К.

Для конденсации CO_2 при атмосферном давлении из выбросов с концентрацией, близкой к фоновой, потребуется температура порядка 150 К, а затраты будут необходимы только на отвод тепла от отбросных газов при охлаждении выбросов до требуемой температуры. Приняв ориентировочно температурный интервал охлаждения $\Delta T = 300$ К, среднюю теплоемкость

выбросов (по воздуху) в этом интервале $c_{pm} = 1,075 \text{ кДж}/(\text{кг К})$ и среднюю плотность $\rho_m = 1,57 \text{ кг}/\text{м}^3$, получим затрату энергии на теплоотвод при охлаждении выбросов равной $506 \text{ кДж}/\text{м}^3$.

Расчеты показывают, что из возможных способов гипотетического удаления парниковых газов за эталонный способ наиболее корректно принять вымораживание CO_2 при нормальном атмосферном давлении. Начальная температура конденсации определится заданным парциальным давлением CO_2 , а конечная температура, определенная по его фоновому парциальному давлению, составит около $-120 \text{ }^\circ\text{C}$. Энергозатраты такого процесса высоки и, очевидно, пока не позволяют его реализовать. Однако по величине они оптимальны в качестве критерия оценки энергоэкологической эффективности очистных устройств. Затраты других возможных способов на 3-4 порядка выше, и роль начальной концентрации CO_2 нивелируется, а объективность полученных на их основе показателей снижается.

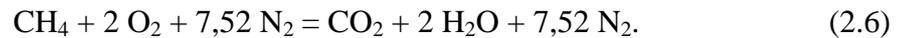
Преимущество и в сравнительной простоте расчетов конденсации по сравнению с другими способами, например, с абсорбцией или адсорбцией. В то же время теплотехнический расчет конденсационной обработки выбросов имеет ряд существенных отличий от типовых расчетных методик. Они разработаны для конденсации чистого пара и пригодны при небольшой доле неконденсирующихся компонентов ([58]). Отсутствие типовой расчетной методики для конденсации отдельных паров из смеси не конденсирующихся газов осложняет применение показателя энергоэкологичности. Рассмотрим особенности теоретической базы расчета конденсации загрязнителей, полная схема которого будет представлена далее в разд. 2.4.

Основой показателя является величина теплового потока от парогазовой смеси к хладоносителю, который рассчитывается, как и в типовых расчетах конденсаторов 100%-го пара, по эмпирическим уравнениям, общепринятым для теории тепло- и массопереноса. Но здесь в отличие от типовой методики могут возникать погрешности, в частности, из-за произвола в выборе основного компонента конденсирующейся смеси, по которому подбираются уравнения и константы, назначаются основные параметры – начальная t_b и конечная t_e температура конденсации. Имеется и ряд других затруднений. Основные из них: отсутствие зависимостей для определения коэффициентов тепло- и массоотдачи при конденсации паров отдельных соединений из потока неконденсирующихся газов, в т.ч. с учетом частичной конденсации перегретых паров загрязнителей на поверхностях теплообмена; сложность увязки тепловых потоков из-за жесткой связи начальной и конечной температуры поверхности конденсации с заданной концентрацией загрязнителей на входе и выходе; сложность точного определения температуры среды и ограждений, что влияет на подбор

эмпирических зависимостей, вид которых зависит от интерполяционных коэффициентов при показателях степеней переменных.

Даже несущественные для расчетов конденсаторов погрешности могут привести к потере однозначности показателя энергоэкологичности, т.к. он определяется путем сопоставления энергозатрат на отвод тепловых потоков от выброса к хладоносителю. Схема же расчета, полностью учитывающая все особенности конденсации загрязняющих компонентов выбросов, громоздка и сама по себе усложняет определение показателя. Целесообразнее положить в его основу энергозатраты только на конденсацию «парниковых» газов из выбросов оцениваемых тепловых систем для защиты окружающей среды или очистных устройств малоотходных промышленных теплоисточников, и из выбросов эталонного состава, содержащих «парниковые» газы.

В качестве корректного и удобного объекта сравнения, выбросы которого приняты за эталон, рассматривается идеальное устройство для сжигания газового топлива (для определенности – метана) в смысле обеспечения полного сгорания метана при теоретическом потреблении окислителя в соответствии со стехиометрическим уравнением реакции окисления в воздухе:



Количество метана должно быть эквивалентно по теплоте сгорания затрате энергии на гипотетическое снижение концентрации CO_2 и H_2O в исследуемых выбросах. Состав эталонных продуктов сгорания ($r_{\text{CO}_2}^W = 9,506\%$ об., $r_{\text{H}_2\text{O}}^W = 19,011\%$ об., $r_{\text{N}_2}^W = 71,483\%$ об.) и все физико-химические характеристики соединений, участвующих в реакции, хорошо известны. Это обеспечит однозначность оценки оцениваемых очистных устройств посредством сравнения энергозатрат, т.е. выявления в результате расчета степени их энергоэкологичности *EER* (Energy and Ecology Ratio) и энергоэкологической эффективности *EEE* (Energy and Ecology Efficiency). Оценочные показатели определяются как отношение энергозатрат $E_a^{dn} = E_{a\text{H}_2\text{O}}^{dn} + E_{a\text{CO}_2}^{dn}$ на отвод теплоты конденсации CO_2 и H_2O в выбросах, к энергозатратам E_{fg} , которые были бы необходимы для удаления «парниковых» газов из эталонных дымовых газов. При этом их объем определится по теплоте сгорания метана в количестве, покрывающем энергозатраты E_a на охлаждение выбросов с учетом конденсации содержащихся в них CO_2 и H_2O . Использование газопотребляющей системы в качестве объекта сравнения диктуется тем, что однозначность параметров, соответствующая фундаментальности соотношения (2.6), дает простые и удобные для расчетов зависимости между энергозатратами исследуемого объекта и модели. Кроме того,

производство энергии, в т.ч. и на процессы, связанные с охлаждением, осуществляется преимущественно за счет сжигания топлива. Схема расчета может быть следующей.

1. Анализируются исходные данные. Должны быть заданы: температура t_a , °С, расход W_a , м³/с, выбросов и их состав, включая содержание «парниковых» газов и выбросов.

2. По плотности компонентов ρ_i , кг/м³, и объемному составу $r_i^{W(D)}$, % об., определяется средневзвешенная плотность влажных (сухих) выбросов $\rho_a^{W(D)}$, кг/м³. Затем находят массовый расход выбросов

$$M_a^{W(D)} = \rho_a^{W(D)} \cdot W_a^{W(D)}, \text{ кг/с}, \quad (2.7)$$

объемные W_i , м³/с, и массовые M_i , кг/с, расходы компонентов выбросов. По значениям M_i и $M_a^{W(D)}$ определяются массовые доли компонентов выбросов в пересчете на влажный (сухой) состав.

3. Определяются 4 температурных диапазона, в пределах которых происходит изменение состава выбросов в связи с конденсацией CO_2 и H_2O :

$$\Delta t_{a1} = t_a - t_{bH_2O}; \Delta t_{a2} = t_{bH_2O} - t_{eH_2O}; \Delta t_{a3} = t_{eH_2O} - t_{bCO_2}; \Delta t_{a4} = t_{bCO_2} - t_{eCO_2}, \quad (2.8)$$

где t_{bH_2O} , t_{bCO_2} – температура начала конденсации при заданном парциальном давлении паров H_2O и CO_2 ; $t_{eH_2O} = 6,5$ °С, $t_{eCO_2} = -120$ °С – температура окончания конденсации, соответствующая парциальному давлению паров H_2O и CO_2 при их концентрации в выбросах, равных фоновым.

В пределах этих диапазонов находят необходимые для расчетов физико-химические характеристики выбросов.

4. Вычисляется средняя массовая теплоемкость выбросов $c_{pa}^{W(D)}$, кДж/(кг К), по влажному (сухому) составу в указанных диапазонах:

$$\begin{aligned} c_{pa}^W \Big|_{\Delta t_{a1}} &= \sum_{i=1}^N m_i^W c_{pi}^W \Big|_{\Delta t_{a1}}; c_{pa}^W \Big|_{\Delta t_{a2}} = \sum_{i=1}^N m_i^W c_{pi}^W \Big|_{\Delta t_{a2}}; c_{pa}^{D1} \Big|_{\Delta t_{a2}} = \sum_{i=1}^{N-1} m_i^{D1} c_{pi}^{D1} \Big|_{\Delta t_{a2}}; \\ c_{pa}^{D1} \Big|_{\Delta t_{a3}} &= \sum_{i=1}^{N-1} m_i^{D1} c_{pi}^{D1} \Big|_{\Delta t_{a3}}; c_{pa}^{D1} \Big|_{\Delta t_{a4}} = \sum_{i=1}^{N-1} m_i^{D1} c_{pi}^{D1} \Big|_{\Delta t_{a4}}; c_{pa}^{D2} \Big|_{\Delta t_{a4}} = \sum_{i=1}^{N-2} m_i^{D2} c_{pi}^{D2} \Big|_{\Delta t_{a4}}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Количество отводимого тепла q , кДж/кг, при охлаждении 1 кг выбросов в указанных диапазонах

$$q_1 = c_{pa}^W \Big|_{\Delta t_{a1}} \cdot \Delta t_{a1}; q_2^W = c_{pa}^W \Big|_{\Delta t_{a2}} \cdot \Delta t_{a2}; q_2^D = c_{pa}^{D1} \Big|_{\Delta t_{a2}} \cdot \Delta t_{a2}; q_2 = (q_2^W + q_2^D)/2;$$

$$q_3 = c_{pa}^W \Big|_{\Delta t_{a3}} \cdot \Delta t_{a3}; q_{41} = c_{pa}^{D1} \Big|_{\Delta t_{a4}} \cdot \Delta t_{a4}; q_{42} = c_{pa}^{D2} \Big|_{\Delta t_{a4}} \cdot \Delta t_{a4}; q_4 = (q_{41} + q_{42})/2. \quad (2.10)$$

В диапазоне 2 за количество отводимой энергии упрощенно принимается среднее между количествами теплоты, отводимой при охлаждении газов с начальным и фоновым количеством паров H_2O , а в диапазоне 4 – с начальным и фоновым содержанием CO_2 .

6. Энергозатраты E_a^q , кВт, на охлаждение заданного расхода выбросов M_a , кг/с:

$$E_{a1}^q = q_1 M_a^W; E_{a2}^q = q_2 (M_a^W + M_a^{D1})/2; E_{a3}^q = q_3 M_a^{D1}; E_{a4}^q = q_4 (M_a^{D1} + M_a^{D2})/2. \quad (2.11)$$

$$E_a^q = E_{a1}^q + E_{a2}^q + E_{a3}^q + E_{a4}^q. \quad (2.12)$$

7. Энергозатраты на отвод тепла при конденсации водяных паров:

$$E_{aH_2O}^{dn} = r_{H_2O}^{ev} \Big|_{\Delta t_{a2}} \cdot M_{H_2O} \text{ кВт}, \quad (2.13)$$

где $r_{H_2O}^{ev} \Big|_{\Delta t_{a2}}$ – средняя в диапазоне Δt_{a2} теплота конденсации H_2O , кДж/кг.

8. Энергозатраты на отвод тепла при конденсации диоксида углерода:

$$E_{aCO_2}^{dn} = (I''_{CO_2} - I'_{CO_2}) \Big|_{\Delta t_{a4}} \cdot M_{CO_2} \text{ кВт}, \quad (2.14)$$

где $(I''_{CO_2} - I'_{CO_2}) \Big|_{\Delta t_{a4}}$ – средняя в диапазоне Δt_{a4} разность энтальпии твердой и паровой фаз CO_2 , кДж/кг.

9. Суммарные энергозатраты на удаление водяных паров и диоксида углерода из заданного состава и количества выбросов:

$$E_a = E_a^q + E_{aH_2O}^{dn} + E_{aCO_2}^{dn} \text{ кВт}. \quad (2.15)$$

10. Расход метана W_f , м³/с, сжигаемого для обеспечения требуемых энергозатрат E_a :

$$W_f = E_a / (\eta_f Q_l) \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.16)$$

где Q_l – низшая теплота сгорания топлива, кДж/м³; η_f – коэффициент использования энергии топлива при обеспечении энергозатрат в процессе охлаждения выбросов и конденсации CO_2 и H_2O .

11. Расход эталонных продуктов сгорания W_{fg} , м³/с, по (2.6):

$$W_{fg} = V_{fg} W_f = 10,52 W_f, \quad (2.17)$$

где $V_{fg} = 10,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$ – теоретический объем дымовых газов, образующихся при сжигании 1 м^3 метана по уравнению (2.6).

Состав сухих эталонных продуктов сгорания по стехиометрическому соотношению $\text{CO}_2/7,52\text{N}_2$: $r_{\text{CO}_2}^D = 11,74 \text{ \% об.}$; $r_{\text{N}_2}^D = 88,26 \text{ \% об.}$

12. Расходные характеристики CO_2 , H_2O , N_2 в эталонных продуктах сгорания, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$W_{\text{CO}_2} = 0,01W_{fg} r_{\text{CO}_2} = W_f; W_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01W_{fg} r_{\text{H}_2\text{O}} = 2W_f; W_{\text{N}_2} = 0,01W_{fg} r_{\text{N}_2} = 7,52W_f. \quad (2.18)$$

13. Средневзвешенная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$, влажных и сухих эталонных продуктов сгорания:

$$\rho_{fg}^W = 0,01 \sum_{i=1}^N r_i^W \rho_i = 1,234; \rho_{fg}^D = 0,01 \sum_{i=1}^{N-1} r_i^D \rho_i = 1,336. \quad (2.19)$$

14. Массовые расходы эталонных продуктов сгорания и их компонентов в пересчете на влажный и сухой составы.

14.1 Массовый расход влажных продуктов сгорания и их компонентов, $\text{кг}/\text{с}$:

$$M_{fg}^W = \rho_{fg}^W W_{fg} = 12,98W_f \quad (2.20)$$

$$M_{\text{CO}_2} = W_{\text{CO}_2} \rho_{\text{CO}_2} = 1,98W_f; M_{\text{H}_2\text{O}} = W_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1,60W_f; M_{\text{N}_2} = W_{\text{N}_2} \rho_{\text{N}_2} = 9,40W_f \quad (2.21)$$

14.2 Состав влажных продуктов сгорания $m_i^W = M_i / M_{fg}^W$, % мас.:

$$m_{\text{CO}_2}^W = M_{\text{CO}_2} / M_{fg}^W = 15,25; m_{\text{H}_2\text{O}}^W = M_{\text{H}_2\text{O}} / M_{fg}^W = 12,33; m_{\text{N}_2}^W = M_{\text{N}_2} / M_{fg}^W = 72,42 \quad (2.22)$$

14.3 Массовый расход сухих продуктов сгорания, $\text{кг}/\text{с}$:

$$M_{fg}^D = M_{fg}^W - M_{\text{H}_2\text{O}} = 11,38W_f \quad (2.23)$$

14.4 Состав сухих продуктов сгорания $m_i^D = M_i / M_{fg}^D$, % мас.:

$$m_{\text{CO}_2}^D = M_{\text{CO}_2} / M_{fg}^D = 17,40; m_{\text{N}_2}^D = M_{\text{N}_2} / M_{fg}^D = 82,60. \quad (2.24)$$

15. Количество тепла, отводимого при охлаждении 1 кг эталонных продуктов сгорания.

Начальная температура эталонных продуктов сгорания принимается равной calorиметрической температуре горения метана $t_c = 1930 \text{ }^\circ\text{C}$ как однозначно определяемой для условий, соответствующих стехиометрическому уравнению его окисления (2.6). Температурный интервал до $t_{e\text{CO}_2} = -120 \text{ }^\circ\text{C}$ – температуры окончания конденсации паров CO_2 при их фоновой концентрации в выбросах, разбивается на 4 диапазона, соответственно парциальным давлениям паров H_2O и CO_2 в составе эталонных продуктов сгорания. Итак, при $r_{\text{CO}_2} = 9,506\% \text{ об.}$ и $r_{\text{H}_2\text{O}} = 19,011\% \text{ об.}$, $t_{b\text{H}_2\text{O}} = 59,1^\circ\text{C}$ ($332,2 \text{ K}$), $t_{b\text{CO}_2} = -102,3^\circ\text{C}$ ($170,8 \text{ K}$).

Соответствующие температурные диапазоны: $\Delta t_{1fg} = 1870,9^\circ\text{C}$; $\Delta t_{2fg} = 52,1^\circ\text{C}$; $\Delta t_{3fg} = 109,3^\circ\text{C}$; $\Delta t_{4fg} = 17,7^\circ\text{C}$. Средние массовые теплоемкости, кДж/(кг К), эталонных продуктов сгорания в этих диапазонах:

$$\begin{aligned} c_{pfg}^W \Big|_{\Delta t_{1fg}} &= \sum_{i=1}^N m_i^W c_{pi}^W \Big|_{\Delta t_1} = 1,315; c_{pfg}^W \Big|_{\Delta t_{2fg}} = \sum_{i=1}^N m_i^W c_{pi}^W \Big|_{\Delta t_2} = 1,115; c_{pfg}^D \Big|_{\Delta t_{2fg}} = \sum_{i=1}^{N-1} m_i^D c_{pi}^D \Big|_{\Delta t_2} = 1,0 \\ c_{pfg}^D \Big|_{\Delta t_{3fg}} &= \sum_{i=1}^{N-1} m_i^D c_{pi}^D \Big|_{\Delta t_3} = 0,993; c_{pfg}^D \Big|_{\Delta t_{4fg}} = \sum_{i=1}^{N-1} m_i^D c_{pi}^D \Big|_{\Delta t_4} = 0,981; c_{pfg}^D \Big|_{\Delta t_{4fg}} = c_{pN_2}^D \Big|_{\Delta t_{4fg}} = 1,04. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Количество отводимого тепла q , кДж/кг, при охлаждении 1 кг эталонных продуктов сгорания в указанных диапазонах

$$\begin{aligned} q_1 &= c_{pfg}^W \Big|_{\Delta t_{1fg}} \cdot \Delta t_{1fg} = 2459,9; q_2^W = c_{pfg}^W \Big|_{\Delta t_{2fg}} \cdot \Delta t_{2fg} = 58,1; q_2^D = c_{pfg}^D \Big|_{\Delta t_{2fg}} \cdot \Delta t_{2fg} = 52,7 \\ q_2 &= (q_2^W + q_2^D) / 2 = 55,4; q_3 = c_{pfg}^D \Big|_{\Delta t_{3fg}} \cdot \Delta t_{3fg} = 108,5; q_{41} = c_{pfg}^D \Big|_{\Delta t_{4fg}} \cdot \Delta t_{4fg} = 17,4; \\ q_{42} &= c_{pN_2}^D \Big|_{\Delta t_{4fg}} \cdot \Delta t_{4fg} = 18,4; q_4 = (q_{41} + q_{42}) / 2 = 17,9. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Энергозатраты на охлаждение эталонных продуктов сгорания в указанных диапазонах E_{fgi}^q и в целом E_{fg}^q , кВт:

$$\begin{aligned} E_{fg1}^q &= q_1 M_{fg}^W = 31930,3 \eta_f W_f; E_{fg2}^q = q_2 (M_{fg}^W + M_{fg}^D) / 2 = 674,8 \eta_f W_f; \\ E_{fg3}^q &= q_3 M_{fg}^D = 1235,1 \eta_f W_f; E_{fg4}^q = q_4 (M_{fg}^D + M_{N_2}) / 2 = 186,0 \eta_f W_f. \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$E_{fg}^q = E_{fg1}^q + E_{fg2}^q + E_{fg3}^q + E_{fg4}^q = 34026,2 \eta_f W_f. \quad (2.28)$$

16. Энергозатраты на отвод тепла при конденсации паров H_2O , содержащихся в эталонных продуктах сгорания, кВт:

$$E_{fg H_2O}^{dn} = r_{H_2O}^{ev} \Big|_{\Delta t_{2fg}} \cdot M_{H_2O} = 3868,5 \eta_f W_f \text{ кВт}, \quad (2.29)$$

где $r_{H_2O}^{ev} \Big|_{\Delta t_{2fg}}$ – средняя в диапазоне Δt_{2fg} теплота конденсации H_2O , кДж/кг.

17. Энергозатраты на отвод тепла для конденсации диоксида углерода, содержащегося в эталонных продуктах сгорания, кВт:

$$E_{fg CO_2}^{dn} = (I''_{CO_2} - I'_{CO_2}) \Big|_{\Delta t_4} \cdot M_{CO_2} = 1162,7 \eta_f W_f, \quad (2.30)$$

где $(I''_{CO_2} - I'_{CO_2})|_{\Delta t_{4fg}}$ – средняя в диапазоне Δt_{4fg} разность энтальпии твердой и паровой фаз CO_2 , кДж/кг.

18. Суммарная затрата энергии на удаление водяных паров и диоксида углерода из эталонных продуктов сгорания, кВт:

$$E_{fg} = E_{fg}^q + E_{fg H_2O}^{dn} + E_{fg CO_2}^{dn} = 39057,4\eta_f W_f. \quad (2.31)$$

19. Степень энергоэкологичности i – го очистного устройства

$$EER_i = 1 - \frac{E_a^{dn}}{E_{fg}} = 1 - \frac{E_{aH_2O}^{dn} + E_{aCO_2}^{dn}}{39057,4\eta_f W_f} = 1 - \frac{Q_l (E_{aH_2O}^{dn} + E_{aCO_2}^{dn})}{39057,4E_a} = 1 - \frac{E_{aH_2O}^{dn} + E_{aCO_2}^{dn}}{1,10E_a}. \quad (2.32)$$

Представленный безразмерный показатель характеризует минимальные энергозатраты, которые потребовались бы при необходимости удаления «парниковых газов» из выбросов после изучаемых очистных устройств. Указанные энергетические затраты определяются для идеального (гипотетического) случая, когда содержание CO_2 в выбросе исследуемого источника не превышает фоновой концентрации, характерной для незагрязненной атмосферы. Поэтому показатель EER может быть использован в качестве энергетического «рейтинга» при оценке экологического совершенства газоочистных и топливоиспользующих систем с точки зрения предотвращения загрязнения атмосферы «парниковыми» газами. Очевидно, что источник, сбрасывающий меньше «парниковых» газов, имеет более высокий показатель и, соответственно, «рейтинг».

Энергоэкологическая эффективность очистных устройств, определяемая в форме $EEE_i = 1 - (EER_i / EER_j)$, может также служить численным показателем совершенства способов газоочистки при их отборе для конкретных типов производственных выбросов. Это будет способствовать систематизации газоочистных систем, отбору наиболее оптимальных путей их совершенствования, созданию конструкций аппаратов и схем очистки, отвечающих требованиям современной экологической ситуации.

По представленной методике проведено сопоставление очистных устройств для вентиляционных выбросов цеха испытания двигателей – адсорбер и реактор термokatалитического окисления. Отходящие газы после очистных устройств имеют примерно одинаковый состав, но различную интенсивность. Расчеты позволяют надежно выявлять

системы очистки с меньшими энергозатратами, при условии учета загрязнения атмосферы парниковыми газами. Таким образом, использование представленной выше методики необходимо для создания оптимальных систем очистной обработки воздуха и производственных выбросов.

2.2 Совершенствование расчетов ПДВ для высоких источников (дымовых труб ТЭС)

Научной базой расчетов ПДВ производственного источника служит теория атмосферной диффузии примеси в атмосфере. В разд. 1.2 показано, что для решения системы уравнений турбулентной диффузии необходимо найти представительные способы осреднения мгновенных пульсаций и принять дополнительные зависимости, связывающие осредненные пульсации с опытно определяемыми параметрами. Обе проблемы носят принципиальный характер и на настоящее время теоретического решения не имеют. При решении задач избежать определенного произвола в подборе соотношений и эмпирических коэффициентов для замыкания системы уравнений турбулентной диффузии не удастся.

Л. Прандтль [133] предложил заменить пульсационные скорости величинами, связанными с распределением средней скорости. Он считал, что в качестве такой величины для практических расчетов следует использовать «определенную длину, которую можно понимать либо как диаметр шарообразного скопления частиц жидкости, движущихся как одно целое, либо как путь, который этот шар должен пройти относительно остальной жидкости, чтобы в результате смешения с окружающим турбулентным потоком потерять свою индивидуальность. Заранее нельзя сказать, что обе эти длины в точности равны друг другу, однако можно предполагать, что между ними существует определенная пропорциональность».

Такими образом, интенсивность турбулентного переноса по Прандтлю может быть охарактеризована коэффициентом турбулентного перемешивания

$$H = \rho u'_{my} l'_m. \quad (2.33)$$

По аналогии с ламинарным движением его еще называют динамическим коэффициентом турбулентной вязкости; существует и кинематический коэффициент турбулентной вязкости

$$N = u'_{my} l'_m. \quad (2.34)$$

Коэффициенты H , N не имеют физического смысла вязкости жидкости, т.к. вязкость турбулентного или ламинарного потоков определяется не параметрами перемещений условно выделенных в них объемов, а силами межмолекулярного взаимодействия. С помощью H , N

мгновенные значения пульсаций скорости заменяются осредненными во времени значениями проекций пульсаций скорости, ориентированными в направлении оси OY (перпендикулярном линиям тока с осредненной скоростью) u'_{my} , т.е. в направлении кратчайшего пути и минимального действия при переносе.

Интенсивность перемешивания принимают пропорциональной и некоторой линейной величине l'_m , также характеризующей пульсации осредненными во времени. По аналогии с характеристикой ламинарного движения – длиной свободного пробега молекулы, l'_m можно представить как длину свободного пробега моля, пульсирующего с одной линии тока на другую, пока он не смешается с окружающим потоком. Л. Прандтль так и называл эту величину – путь смешивания: «Длина, которую мы будем называть длиной пути перемешивания (*Mischungswege*), имеет некоторое родство с длиной пути свободного пробега молекул в кинетической теории газов. В этой теории перенос количеств движения, вызванный молекулярным движением, рассматривается совершенно так же, как это мы только что сделали для переноса количеств движения, вызванного грубым (молярным) движением жидких шариков». Для определения коэффициента турбулентной вязкости Прандтль в 1925 г. предложил постулат ([133]), в соответствии с которым характерный масштаб пульсаций скорости (поперек течения, в направлении оси y) равен градиенту скорости осредненного течения, умноженному на путь смешения как характерный масштаб расстояний по потоку. На его основании можно получить:

$$N = (l'_m)^2 \partial u_{mx} / \partial y. \quad (2.35)$$

Длина пути смешения должна была определяться опытным путем. Такие полуэмпирические модели (теории) турбулентности, где часть величин определялась экспериментально, позволят решать некоторые типы задач, связанных с турбулентными течениями. Для их применения к расчетам передвижения воздушных масс в атмосфере, имеющих стохастический характер, необходимы дальнейшие упрощения. Принимают упрощенно, что силы плавучести (возникающие при наличии градиента температуры по высоте атмосферы), оказывая существенное влияние на размеры и интенсивность пульсаций турбулентных вихрей, не порождают осредненного перемещения загрязнителя по вертикали. Это позволяет для легкой примеси на ровной местности считать $u_z = 0$. Если принять направление ветра по оси x , то $u_y = 0$. Можно не учитывать также молекулярную диффузию примеси в направлении оси x , в котором она значительно слабее турбулентной диффузии. Тогда для стационарного процесса рассеивания общее уравнение турбулентной диффузии принимает вид

$$(u_{mx} + u'_x) \frac{\partial C_i}{\partial x} = -H \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \right). \quad (2.36)$$

Для уравнения (2.36) принимаются следующие граничные условия [54]:

$$u \cdot C = M \cdot \delta(y) \cdot \delta(z-H), \text{ при } x = 0; \quad (2.37)$$

$$C \rightarrow 0 \text{ при } z = \infty \text{ и при } |y| \rightarrow \infty; \quad (2.38)$$

$$H \frac{\partial C_i}{\partial z} = 0 \text{ при } z = 0, \quad (2.39)$$

где M кг/с – интенсивность источника загрязнения; $x=0, y=0, z=H$ – его координаты; $\delta(y), \delta(z-H)$ – дельта-функции, m^{-1} .

Условие (2.37) выражает равенство интенсивности точечного источника и потока примеси от него, (2.38) – убывание концентрации примеси с удалением от источника, (2.39) – непроницаемость подстилающей поверхности для примеси. Однако поверхность может частично или полностью поглощать примесь, например, осаждая дисперсные и поглощая газовые загрязнители. Последнее приобретает особенное значение для расчетов, связанных с выбросом наиболее распространенного парникового газа CO_2 , в которых (2.39) должно быть заменено условием частичной или полной проницаемости. Для этого весьма важно корректное решения обратной задачи, имеющей глобальное значение – определения объемов поглощения CO_2 .

Для решения уравнения (2.36) при граничных условиях (2.37, 2.38, 2.39) необходимо представить аналитически зависимость изменения H в направлениях y, z и распределения скорости ветра по высоте атмосферы.

В приземном слое атмосферы принимают ([54]):

$$H_z = H_1 \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - Ri_m}, \quad (2.40)$$

где H_1 – значение H_z на высоте $z_1=1$ м при равновесных условиях, m^2/c ; Ri_m – среднее по высоте приземного слоя значение числа Ричардсона, характеризующего отношение сил плавучести и инерции в атмосфере, соответственно в градиентном и интегральном виде:

$$Ri = \frac{g\beta}{Pr_T} \cdot \frac{\partial T/\partial z}{(\partial u/\partial z)^2}; \quad Ri = \frac{gl}{u^2} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{gl}{u^2} \beta \Delta T. \quad (2.41)$$

В (2.41) β – термический коэффициент объемного расширения, K^{-1} ; Pr_T – турбулентное число Прандтля ($Pr_T = 0,7$); l – характерный размер (толщина слоя атмосферы), м; ρ – разность плотности выбросов на высоте z и у поверхности земли, kg/m^3 .

Профиль скорости ветра описывается зависимостью

$$u = u_1 \left(\lg \frac{z}{z_0} / \lg \frac{z_1}{z_0} \right), \quad (2.42)$$

где u_1 – скорость ветра на высоте z_1 , м/с; z_0 – шероховатость подстилающей поверхности ($z_0 = 0,01$ м).

По значению температурного градиента $\partial T/\partial z$ различаются режимы переноса воздушных потоков за счет сил плавучести по высоте атмосферы. Когда падение температуры выбросов по вертикали соответствует сверхадиабатическому градиенту $\partial T/\partial z \gg g/c_p$, холодные воздушные потоки интенсивно опускаются к поверхности, вытесняя нагретый воздух по всем направлениям, в т.ч. по вертикали. Состояние атмосферы с неинтенсивным турбулентным обменом (равновесная стратификация) характеризуется адиабатическим градиентом $\partial T/\partial z \approx g/c_p$ ($\Delta T/\Delta z \approx 0,01$ К/м) и устойчивым воздухообменом в вертикальном направлении. При положительном градиенте температуры, в состоянии температурной инверсии, холодные слои оказываются внизу, и вертикальный воздухообмен может прекратиться. Приземная температурная инверсия может достигать высоты нескольких сотен метров.

Применение выражений (2.36) и последующих, связанных с принятым выше упрощением в отношении сил плавучести, является корректным для равновесной стратификации. Учитывая, что температура по высоте приземного слоя атмосферы (100 м) практически не изменяется, выражение (2.36) может использоваться при слабой турбулентности. Возможность расширения пределов его применения при значениях $\partial T/\partial z \geq g/c_p$ может быть установлена для каждого конкретного случая опытным путем. В [54] предлагаются упрощенные зависимости, в которых, в отличие от (2.40, 2.42), используются ориентировочные параметры для определения скорости и компонент коэффициента турбулентной диффузии H_y, H_z , по направлениям Y, Z , подобранные так, чтобы результат соответствовал опытным данным:

$$u = u_1 z; \quad (2.43)$$

$$H_z = H_1 z; \quad (2.44)$$

$$H_y = l_0 u; \quad (2.45)$$

где u_1, H_1 – безразмерные параметры, подобранные из условия наилучшего соответствия фактических и расчетных профилей скорости ветра и коэффициента обмена ($u_1 \approx 1, H_1 \approx 0,15$); l_0

- характерный размер, который также подбирается из условия соответствия опытным данным ($l_0 = 0,1 \dots 0,5$ м при устойчивой стратификации и до 1 м при неустойчивой стратификации).

Для условия инверсии в [134] предлагалось уравнение баланса энергии турбулентности

$$a_1 \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{H} \cdot \frac{\partial k}{\partial z} + \mathbf{H} \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{g}{T} \mathbf{H} \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{c_1 k^2}{\mathbf{H}}, \quad (2.46)$$

где a_1, c_1 – безразмерные постоянные, принимаемые по [135] равными 0,73 и 0,046.

Предлагается также ([134, 54]) принять \mathbf{H} пропорциональным энергии турбулентности k :

$$\mathbf{H} = \hat{T} \cdot k, \quad (2.47)$$

а параметр \hat{T} – не изменяющимся в пределах инверсионного слоя и пропорциональным лагранжеву временному масштабу турбулентности.

Следовательно, в основе предложения М.Е. Берлянда и Е.Л. Гениховича лежит простое условие равенства действий: удельного действия в виде коэффициента турбулентной диффузии \mathbf{H} действию $\hat{T} \cdot k$, производимому энергией турбулентности k . Принцип равенства действий универсален для всех явлений, и турбулентная диффузия в атмосфере не составляет исключения. Поэтому теория, построенная на его основе, принципиально не может быть неверной, и вряд ли есть необходимость ее кардинального усовершенствования. Однако указанный принцип, как и другие фундаментальные соотношения, не дает возможности обходиться без эмпирических параметров при составлении математических моделей. Поэтому точность расчетных результатов будет зависеть и от используемых опытных коэффициентов. Весьма совершенными эмпирическими базами данных снабжены в настоящее время пакеты программ CFD. Реализация на их основе предлагаемого в [134] подхода, при условии надлежащей отработки необходимых схем расчетов и подбора требуемых параметров в рамках численного эксперимента, позволит исключить неадекватность и более точно связать нормируемую величину выброса источника с ПДК выбрасываемых загрязнителей.

2.3 Совершенствование теоретической базы расчетов сепарации мультифазных выбросов производственных объектов теплоэнергетики

2.3.1 Математическое моделирование инерционной сепарации взвешенной части дымовых газов

Наличие в турбулентном потоке взвешенных частиц еще более усложняет постановку и решение задачи определения его характеристик. К одной из основных сложностей описания реального движения мультифазного потока можно отнести учет влияния различия форм и

размеров элементов дисперсной фазы на их взаимодействия между собой и с несущей фазой. Задача определения параметров, отвечающих за степень согласованности движения фаз в вихревом потоке, не поддается аналитическому решению. В последнее время наблюдается развитие способов упрощений, имеющих целью создание математической модели процесса, включающего оценку влияния взаимодействия элементов дисперсной фазы и вихрей несущего потока на их последующее движение. Вместе с тем, обычно в процессах очистки мультифазных выбросов энергетических объектов содержание взвеси по сравнению с системами пневмотранспорта можно считать невысоким, и за основную проблему принимается адекватность моделирования первичного взаимодействия турбулентности газового потока и частиц.

Во многих численных моделях явно или неявно предполагается, что частицы значительно меньше всех линейных масштабов турбулентности. Движение таких точечных частиц и величину точечных сил, приложенных этими частицами к газовой фазе, рассчитывают по выражениям для сопротивления одиночной сферы в однородном потоке, и определяют соответствующее изменение (модификацию) турбулентности. По [136] подобная расчетная техника может быть приемлема для частиц и вихрей, значительно различающихся в размерах. Но в практических задачах сепарации продуктов сжигания пылевидного топлива диаметр частиц золы d может иметь одинаковый порядок с линейным масштабом Колмогорова η для однофазного потока, ввиду чего развитие физически приемлемых моделей для случая $d \approx \eta$ требует самого скрупулезного моделирования взаимодействий между частицами и турбулентностью.

Авторы работ, связанных с перемещениями частиц в турбулентных потоках, часто указывают на неоднозначную сложность процессов, происходящих в реальных системах. Частицы могут концентрироваться локально в областях потока с низкой интенсивностью турбулентности. Затем частицы, в зависимости от инерции (т.е. их размеров и масштаба вихрей) и величины образовавшейся локальной концентрации, могут погасить турбулентность, или же, наоборот, повысить ее интенсивность. В зонах с локальным завышением концентраций становится важным также учет столкновений частиц между собой и со стенками каналов. Поэтому выбор способа моделирования сцепления импульсов и сил между элементами дисперсной фазы и фазой носителя может стать ключевым условием правильного определения характеристик движения и сепарации реальных двухфазных потоков. В [136] в качестве основы моделирования движения обеих фаз приняты: нестационарное уравнение Навье-Стокса для несжимаемой среды, представляющее уравнение сохранения импульсов,

$$\partial \mathbf{u} / \partial t + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} / \rho + g, \quad (2.48)$$

второй закон Ньютона для поступательного движения i -той частицы

$$m_i dV_i / dt = m_i g - \int_{\partial \Omega_i(t)} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} dS \quad (2.49)$$

и уравнение Эйлера для ее вращательного движения

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i) = - \int_{\partial \Omega_i(t)} (\mathbf{x} - \mathbf{X}_i) \times (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}) dS, \quad (2.50)$$

где \mathbf{u} – вектор скорости потока, ρ – плотность жидкости, g – ускорение силы тяжести, m_i – масса, \mathbf{I}_i – матрица моментов инерции, V_i – линейная и $\boldsymbol{\omega}_i$ – вращательная скорость i -той частицы, \mathbf{n} – единичный нормальный вектор, $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений для ньютоновской жидкости:

$$\boldsymbol{\sigma} = -p \mathbf{I} + \mu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T], \quad (2.51)$$

где p , μ – давление и динамическая вязкость жидкости, индекс T означает транспонирование.

Интегралы в уравнениях (2.49, 2.50) соответствуют полной силе и крутке для i -той частицы в несущей среде; $\partial \Omega_i(t)$ – пределы интегрирования по объемам $\Omega_i(t)$, занимаемым i -той частицей в момент времени t . Положение центра i -той частицы X_i и углы (Эйлера) Θ_i определяются из решений уравнений

$$dX_i / dt = V_i; \quad (2.52)$$

$$d\Theta_i / dt = \boldsymbol{\omega}_i. \quad (2.53)$$

Точное решение уравнений (2.48...2.53) с начальными и граничными условиями на поверхностях частиц требует больших вычислительных ресурсов вследствие необходимости расчетов сцепленных характеристик всех частиц с потоком. Подобные принципы заложены в технике произвольных функций Лагранжа-Эйлера (ALE) [137], которая моделирует полностью сцепленное движение частицы с использованием перемещающейся сетки конечных элементов. Чтобы сократить количество расчетов и повысить устойчивость решения, для жидкой и твердой фаз формулируется комбинированное уравнение импульса. Это позволяет избежать вычисления гидродинамических сил и моментов на каждой частице в явном виде. Так как частицы могут свободно перемещаться в пределах вычисляемой зоны в соответствии с силами, приложенными

к ним окружающей жидкостью, в т.ч. – сближаться и сталкиваться. Чтобы программа их при этом замечала, возникает необходимость создания очень мелкой сетки, которая охватывала бы близко расположенные частицы. Недостатком техники ALE является также искажение сетки в процессе моделирования из-за движения частиц, после которого необходимо регенерировать сетку и переносить на нее решение, полученное на старой сетке. Это ведет к увеличению вычислительных затрат, а также служит источником ошибки из-за прогнозирований, которые выполняются после каждой регенерации.

В исследованиях [138, 139, 140] использованы сверхкомплектные сетки (или сетки Химеры), для моделирования трехмерного потока вокруг одинарной неподвижной или вращающейся частицы в течении Couette между двумя движущимися стенами, а также движения группы капель и потока через трубу, заполненную неподвижными сферическими частицами. Система сверхкомплектных сеток состоит из вторичной сетки, пригнутой к границам области моделирования, и основной сетки, установленной на частице, по которой решаются уравнения для потока в области, окружающей неподвижное или движущееся тело. Узлы основной сетки размещают непосредственно на поверхности частицы, как и в ALE. Для обмена информацией между сетками используется вставка на краю основной сетки и на краю области отверстий вторичной сетки. Техника обеспечивает пространственное решение потока носителя на поверхности частицы. Однако она не применялась к сцепленной задаче для свободно перемещающихся частиц, т.к. нет эффективных алгоритмов, обеспечивающих устойчивость численных расчетов при вычислении сил и импульсов на поверхности частицы в явном виде.

В работе [141] представлен способ моделирования потока с движущимися границами (приближение фиктивного домена), использующий технику «распределенного множителя Лагранжа» (distributed Lagrange-multiplier DLM). При помощи техники DLM на регулярной сетке методом конечных элементов решается комбинированное уравнение импульса частиц и жидкости. Считается, что жидкость заполняет всю область решения. Чтобы движение каждого объема жидкости, который имитирует твердое тело (частицу), было жестким (не деформируемым), для него определяется множитель Лагранжа. Его рассматривают как дополнительную массовую силу, обеспечивающую «квазитвердое» движение объемов жидкости, которые были бы заняты частицами. Чтобы указанные объемы несущей среды не накладывались при моделировании, в уравнения Ньютона-Эйлера добавляют силы, взаимно отталкивающие «квазитвердые» области друг от друга на близких расстояниях. Пока техника DLM была использована для двумерного и трехмерного моделирования осаждения нескольких сотен круглых и сферических элементов и в таком виде вряд ли может быть применена для

реальных промышленных выбросов и стоков. Близка к методу DLM по удобству моделирования движения с откликом частицы к потоку носителя техника «подводных границ» (the immersed boundary technique). Присутствие твердой границы моделируется добавлением силового слагаемого в уравнении импульса жидкости, которое решается по всей области, включая область твердой фазы (частиц). Силовое слагаемое определено таким образом, чтобы на границе твердой фазы было удовлетворено условие отсутствия проскальзывания. Метод «подводных границ» использует регулярную структурированную сетку, расположение границы твердой фазы в которой, как правило, не совпадает с расположением искомых параметров жидкости. Поэтому силы по месту расположения неизвестных величин определяются посредством итерации. Усилия прикладываются изнутри и снаружи к узлам, ближайшим к границе твердой фазы, таким образом, чтобы профиль скоростей, соответствующий скорости частицы, заканчивался по месту расположения «подводной границы». Этими усилиями создается и подстраивается обратный ток внутри твердофазной области.

В исследовательской среде получил распространение метод решетки Больцмана (lattice Boltzmann method, LBM), основанный на упрощенных моделях молекулярно-кинетической теории, с таким представлением молекулярного движения в несущей среде, чтобы ее макроскопические усредненные параметры подчинялись уравнениям неразрывности. Методом LBM находят на регулярной решетке функцию распределения скорости для дискретизированной системы «несущая среда – частицы». При этом несущая среда подвергается обработке непосредственно как ансамбль микроскопических частиц («молекул»). Плотность и скорость жидкости могут быть вычислены на основе мгновенных функций распределения скорости, а давление определяется из уравнения состояния. Для рассмотрения в технике в LBM частиц и твердых границ используются граничные узловые элементы, в которых плотность системы «жидкость – частицы» изменяется от плотности фазы несущей среды до плотности твердой фазы. Граничные узлы расположены в центрах тех звеньев решетки несущей среды, которые пересекают границу твердой фазы. Поэтому решение по границе поверхности твердой фазы зависит от интервала решетки. LBM используется для моделирования несжимаемых потоков. В работе [142] отмечается, что LBM дает хорошие результаты в области умеренных чисел Рейнольдса, а при больших значениях Re его применение является ограниченным вследствие влияния сжимаемости потока несущей среды. Отметим, что последнее обстоятельство не может существенно повлиять на точность расчетов дисперсных выбросов промышленности и энергетики. В большинстве устройств золоулавливания и пылеосаждения скорости обрабатываемых потоков находятся в пределах 0,5...10 м/с, и лишь в высокоскоростных аппаратах (типа скоростных вихревых сепараторов)

могут достичь 30-40 м/с. Исключение составляют только скрубберы Вентури; при этом даже для высоконапорных конструкций можно обойтись без учета сжимаемости потока. Подробное обсуждение преимуществ и недостатков техники LBM с точки зрения затраты вычислительных ресурсов приведено в [143].

Вычисления для реальных дисперсных потоков требуют на несколько порядков более мощных вычислительных ресурсов по сравнению с существующими сегодня. Возможности вычислительной техники обеспечивают трехмерное моделирование не более нескольких сотен частиц. Пока можно ставить задачу расчета потоков, приближенных к реальным, если только отказаться от непосредственного определения сил и вращающих моментов по поверхности каждой частицы. Необходимо использование дополнительных упрощений в моделировании потоков вокруг каждой частицы с целью определения параметров движения частиц, вызываемых их взаимодействием с фазой носителя. Для перемещения частицы через расчетную область течения без определения его параметров на каждой поверхности раздела фаз, используется лагранжево уравнение движения частицы. В [144] было представлено уравнение движения частицы от первых принципов с включением влияния пространственных изменений на скорости фазы носителя для условия неоднородной турбулентности:

$$m_p \frac{d\mathbf{V}}{dt} = 3\pi\mu d \left(\mathbf{u} - \mathbf{V} + \frac{d^2 \nabla^2 \mathbf{u}}{24} \right) + \frac{3}{2} d^2 \sqrt{\pi\rho\mu} \int_0^t \left[\frac{d}{d\tau} \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{V} + \mathbf{u} d^2 \nabla^2 / 24)}{\sqrt{t - \tau}} \right] d\tau + \quad (2.54)$$

$$+ \frac{1}{2} m_f \frac{d}{dt} \left(\mathbf{u} - \mathbf{V} + \frac{d^2 \nabla^2 \mathbf{u}}{40} \right) + m_f \frac{D\mathbf{u}}{Dt} + (m_p - m_f) \mathbf{g},$$

где m_p , m_f – массы частицы и жидкости, перемещенной частицей; \mathbf{V} , \mathbf{u} – скорости частицы и жидкости, не возмущенной присутствием частицы; $D/Dt = \partial/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla$; $d/dt = \partial/\partial t + \mathbf{V} \cdot \nabla$ есть полные производные последующего локального элемента жидкости и последующей частицы. Все члены уравнения (2.54) для не возмущенной жидкости вычисляются по положению центра частицы.

В правой части уравнения (2.54) первый член – вязкая (стоксовская) сила сопротивления; второй член – изменение силы Basset, которая представляет увеличение вязкого сопротивления в нестационарном режиме; третий член – добавленная массовая сила, которая требуется для ускорения объема жидкости, перемещаемого сферой; четвертый член – сила, возникающая за счет градиента давления и вязких напряжений в не возмущенной жидкости; пятый член – сила тяжести.

В уравнении (2.54) предполагается, что размер частицы пренебрежимо мал по сравнению с линейным масштабом Колмогорова η в невозмущенном потоке, степень деформации незначительна, и число Re_p невелико. Для турбулентного течения эти три ограничения могут быть выражены как

$$d \ll \eta, d^2 \ll \nu \tau_k; d / |\mathbf{u} - \mathbf{V}| \ll \nu. \quad (2.55)$$

Этими условиями ограничивается применимость уравнения движения частицы Махеу-Рiley. Для областей течений, где число Re_p не соответствует стоксовскому режиму движения потока, как это требуется по условию (2.55), используются уравнения, подобные по своей структуре (2.54), с корректировкой тех или иных членов. Подобная форма уравнения движения частицы при умеренных числах Re_p дана в работе [145]. Пренебрегая корректировками Факсена из-за искривления невозмущенного поля скоростей и с учетом влияния силы тяжести для сопоставимости с уравнением (2.54), уравнение движения частицы в пределах умеренных чисел Re_p представляется в виде:

$$m_p \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{F}_d + 3\pi\mu d \int_{-\infty}^t K(t-\tau) \left(\frac{d\mathbf{u}}{d\tau} - \frac{d\mathbf{V}}{d\tau} \right) d\tau + \\ + C_M m_f \left(\frac{D\mathbf{u}}{Dt} - \frac{d\mathbf{V}}{dt} \right) + m_f \frac{D\mathbf{u}}{Dt} + (m_p - m_f) \mathbf{g}. \quad (2.56)$$

В (2.56) каждое слагаемое имеет тот же физический смысл, как и в уравнении (2.54). Стационарная сила вязкого сопротивления F_d зависит от мгновенной скорости невозмущенной жидкости и скорости центра частицы.

Второе слагаемое учитывает предысторию процесса (влияние динамики потока до начала событий на исследуемый процесс). Оно отличается от соответствующего слагаемого в (2.54) нижним пределом интегрирования и формой подынтегрального выражения. В (2.54) предполагалось отсутствие создаваемого частицей в потоке возмущения до $t = 0$. В [146] показано, что при несоответствии между скоростью частицы и невозмущенного потока в момент времени $t = 0$, когда частица попадает в поток, на ней формируется вихревой слой, что ведет к большому начальному сопротивлению. Для учета начального различия скорости частицы и невозмущенной жидкости необходимо дополнительное условие. В [147] показано, что интеграл предыстории с нижним пределом $-\infty$ эквивалентен интегралу с нижним пределом 0 и дополнительным членом, учитывающим начальное различие скоростей.

Вместе с тем при реальной неоднородной турбулентности течения определение формы функции для выражения предыстории частицы принципиально затруднительно. Отделить

стационарные и нестационарные эффекты в турбулентном течении невозможно, и трудно составить зависимость, подходящую индивидуально для каждого случая. Согласно с расчетами [145, 147] предыстория не существенна при моделировании свободного переноса частицы в некоторый поток, протягиваемый снаружи, из-за того, что временное и конвективное ускорения малозаметны для частицы. Динамика предыстории также не существенна для плотной частицы, введенной в стационарную и колеблющуюся жидкость.

В случаях, где диаметр частицы имеет порядок линейного масштаба флуктуаций в потоке, принципиально возможно использование коррекции Факсена из-за искривления невозмущенного поля скоростей непосредственно вблизи частиц с целью обеспечения точности расчетов сил на их поверхности. Однако математические формулировки коррекций получены аналитически только для небольших чисел Re_p , как в уравнении (2.54). При моделировании обтекания частиц криволинейными потоками выражения, вводящие поправки Факсена, необходимы были бы для всех слагаемых уравнения (2.56) – и стационарного вязкого сопротивления, и предыстории, и дополнительной массовой силы. При этом, в соответствии с [136], коррекции Факсена будут иметь сложную зависимость от искривления поля скоростей даже для простых потоков, и пока в приемлемом для расчетов виде не существуют.

В уравнениях (2.54, 2.56) отсутствуют слагаемые, характеризующие подъемные силы, действующие на не вращающиеся частицы в поперечном направлении (силы Жуковского), и на вращающиеся частицы (силы Магнуса). Их математические выражения также получены аналитически в предположении о небольшом значении числа Re_p . Подъемные силы для частиц в потоках с умеренным Re_p из-за скоростных флуктуаций предполагаются ничтожно малыми в сравнении с силой сопротивления в том же направлении.

По (2.56) можно вычислить параметры движения частицы без решения потока на ее поверхности. При этом предполагается, что частицы намного меньше любых из включаемых в рассмотрение линейных масштабов турбулентности потока и могут считаться точечными. Уравнение (2.56) в представленном виде подходит для моделирования односторонне сцепленных потоков. Для двухстороннего сцепления необходимо смоделировать воздействие силы движущейся частицы на поток и вычислить соответствующие изменения параметров (модификацию) фазы носителя. С этой целью к правой части (2.56) требуется добавление дополнительного силового члена. Для нахождения такой зависимости можно предположить, что на фазу носителя каждой частицей прилагается точечная сила, равная по величине и противоположно направленная силе, действующей на частицу в несущей среде. Тогда сила, определяемая в процессе вычисления по каждому узлу сетки потока, представляется в виде

взвешенной комбинации точечных сил от частиц внутри некоторой локальной области. Такую технику называют приближением точечной силы.

В работе [148] рассматриваются условия ее применимости для двухстороннего сцепления. Поскольку в уравнении (2.56) как математической модели точечно-силового приближения след частицы во внимание не принимается, оно может считаться приближенным к реальности, если след будет рассеиваться вязкими силами. Это имеет место при $d \ll \eta$. Следовательно, это и одно из основных условий применимости точечно-силового приближения. Далее, для расчетов движения частицы по уравнению (2.56) требуются величины скорости невозмущенной жидкости в координатах, соответствующих центру частицы. Так как при двухстороннем сцеплении точечные силы движущихся частиц оказывают воздействие на несущую среду, то скорость невозмущенной жидкости не определяется. По [148], при использовании в (2.56) скорости возмущенной жидкости вместо невозмущенной величина ошибки $\delta = d/\Delta x$, где Δx – интервал сетки, используемой при решении. Поэтому появляется дополнительное ограничение на использование точечно-силового приближения: $d \ll \Delta x$.

При прямом численном моделировании (DNS) турбулентных течений теоретически рассматриваются пульсации во всем диапазоне масштабов, а в вычислительной практике – начиная с линейного масштаба Колмогорова. Для этого интервал сетки должен позволять «видеть» его: $\eta \sim \Delta x$. Если d имеет одинаковый порядок с η турбулентного дисперсного потока, то оба условия, ограничивающие применимость точечно-силового приближения, нарушаются. Авторы [136], основываясь на обзоре экспериментальных исследований последних десятилетий, приходят к выводу, что для многих видов запыленных турбулентных потоков $d \approx \eta$. Для выполнения условия $d \ll \eta$ диаметр частиц должен быть хотя бы на порядок меньше колмогоровского масштаба. Тогда, чтобы оказывать на пульсации, и, соответственно, на поток, такое же воздействие, как и частицы с $d = 150$ мкм, частицы с $d = 15$ мкм должны иметь плотность ρ_p на 2 порядка выше, т.е. около $2 \cdot 10^5$ кг/м³ что следует из равенства времени релаксации $\tau_p = \rho_p d^2 / (18\mu)$. Даже в этом случае эффекты двухстороннего сцепления должны различаться, потому что число Re_p для $d = 15$ мкм будет в 10 раз меньше, чем для $d = 150$ мкм. В соответствии с этими результатами, при загрузке в турбулентный поток частиц с меньшими числами Re_p турбулентность гасится слабее, чем при загрузке частиц с таким же временем релаксации (и числа Стокса), но с большими числами Re_p . Следовательно, условие $d \ll \eta$, используемое в различных подходах моделирования дисперсных турбулентных течений с двухсторонним сцеплением, может приводить к результатам, не соответствующим реальным ситуациям.

Однако с позиции размеров частиц сложность численных исследований реальных потоков заключается не только и не столько в ограничении $d \ll \eta$. Средний размер частиц золы в продуктах сгорания твердого топлива можно принять в пределах 10...40 мкм, что, в определенной степени, удовлетворяет указанному ограничению. Однако твердая фаза реальных дымовых газов при сжигании пылевидного топлива в топках парогенераторов ТЭС всегда полидисперсная, обычно с дисперсией $\sigma = 2...3,5$ и с более высоким содержанием частиц классов PM_{10} , $PM_{2,5}$. При этом необходимо учитывать и присутствие крупных частиц размером до нескольких сот микрометров. Следовательно, даже при успешном развитии методов, подходящих для двухсторонне сцепленного моделирования потоков при условиях, где $d \approx \eta$, они подойдут только для потоков с характеристикой взвешенной части, близкой к монодисперсной.

Принципиально возможно, охватив весь диапазон размеров частиц рассматриваемого вида пыли, найти расчетным путем параметры потоков с монофракционными загрузками, и затем по правилу аддитивности или вариационными методами оценить долю вклада каждой фракции. Однако на этом пути имеют место, по крайней мере, 2 принципиальных затруднения, которые могут в очередной раз свести точность теоретических результатов к удачному подбору эмпирических параметров. Во-первых, это проблема выбора интервала каждой монофракции, и, сообразно с этим, числа монофракций в рассматриваемом диапазоне размеров частиц. Во-вторых, основная часть дисперсной фазы перемещается в потоке не разделенной по размерам, и для оценки долей вкладов фракций линейные методы не подходят, что требует введения новых упрощений и эмпирической информации.

Многими исследователями отмечается, что никакие из существующих на настоящее время схем и подходов моделирования не могут обеспечить сопоставимой с экспериментом точности определения модификации турбулентности при изменении характеристик дисперсной фазы двухфазного потока. Анализ исследовательских работ [149] показывает, что взаимодействие между частицами и турбулентными вихрями в дисперсных потоках неоднозначно, а понимание процесса модификации турбулентности весьма ограничено. В вихревых же аппаратах затрата энергии на создание вращательного движения мультифазного потока, т.е. вихря, специально организуемого для получения силы инерции, от величины которой зависит отделение дисперсной части, может быть достаточно точно идентифицирована. Параметры создаваемого вихря определяются характеристиками потока и аппарата. Поэтому, в отличие от стохастического турбулентного движения, в организованном вихревом потоке нахождение эффективности сепарации взвеси осуществимо через безразмерные комплексные величины, которые включали бы конструктивные характеристики

вихревых аппаратов и гидравлические характеристики течений в них. Такие параметры должны обладать универсальностью и возможностью использования в НИОКР и при эксплуатационной оптимизации аппаратов с вращательным движением потока.

Покажем возможность использования в качестве основы для безразмерной характеристики сепарации взвеси в организованном вихревом потоке введенную в разд. 1.3.3 величину f_R (формула 1.50). Она составлена из постоянных величин, представляющих характерные конструктивные параметры исследуемых аппаратов и энергетические параметры очищаемых потоков. Единице ее измерения [Н/м] соответствует смысл радиального градиента силы в вихревом потоке. При небольших градиентах давления и с учетом общепринятых исходных упрощений (пренебрегая плотностью взвеси), можно считать плотность потока по сечению постоянной, и f_R – константой для исследуемой конструкции аппарата, в меру постоянства начальной скорости u_0 во входном сечении. Можно видеть, что по этой же причине константой может быть только начальный градиент силы, определяемый по входному сечению. При вычислении градиентов силы в сечениях далее по потоку их величины изменяются и от сечения к сечению, и в пределах каждого сечения: они выше у внутренней границы потока, т.к. $u_1 > u_2$. Начальный же градиент силы f_R для каждого типоразмера циклона имеет строго определенную величину, и, следовательно, является как численным параметром аппарата, так и характеристикой потока. Поэтому f_R используется далее как основной параметр для получения обобщенной характеристики энергетического совершенства завихрительных устройств. Отнесем f_R к начальной скорости:

$$f_R/u_0 = \frac{\rho_G u_0}{4} (R_2^{0,5} + R_1^{0,5})^2 = a_c, \text{ Па}\cdot\text{с}. \quad (2.57)$$

Полученную характеристику a_c , Па·с, можно представить как действие, совершаемое над единицей объема (1м^3) выбросов при их обработке в циклоне, если за математическую модель принято выражение (1.40). Используемое здесь понятие действия соответствует физическому параметру, определяемому обычно как интеграл функции Лагранжа L (полной энергии движущегося потока как суммы его кинетической T и потенциальной U энергии) за промежуток времени Δt от начального до конечного момента движения частицы, соответствующего сепарации. В стационарном процессе удельное действие a_c физически представляет произведение начальной кинетической энергии $\rho_G u_0^2/2$ для 1м^3 выбросов на характерное для конструкции аппарата время $(R_2^{0,5} + R_1^{0,5})^2/2u_0$.

Выше для рассматриваемой задачи была обоснована правомерность пренебрежения по сравнению с силами инерции и вязкости силами давления и гравитации, и потенциалы соответствующих полей также не учитываются. Роль вязкости в формировании потока учитывается следующим образом. Единица измерения величины a_c совпадает с единицей измерения вязкости η . Посредством масштабирования приведем a_c к безразмерному виду, отнеся к естественному масштабу удельного (на единицу объема) действия потока – динамическому коэффициенту вязкости. Физически отношение a_c/η показывает, сколько единиц энергии в вязкостном измерении поступает с потоком, и выявляет достаточность поступившей энергии для формирования потока рассматриваемой среды в циклоне с соответствующими геометрическими параметрами. Результатом является безразмерный комплекс, характеризующий действие над вращающимся в циклоне потоком, структура которого соответствует числу Рейнольдса:

$$\text{Re}_c = a_c/\eta = f_R/(u_0\eta) = \rho_G u_0 (R_2^{0.5} + R_1^{0.5})^2 / (4\eta). \quad (2.58)$$

В Re_c входят основные характеристики потока и циклона, что позволяет рассматривать полученный параметр как число Рейнольдса для потока в циклоне и одновременно как безразмерную характеристику энергетического совершенства конкретного аппарата как завихрителя.

Характеристику степени осаждения взвешенной части потока в аппарате можно найти, сопоставив с Re_c аналогичный безразмерный комплекс, характеризующий такой энергетический параметр частицы, перемещающейся в этом потоке, как действие. Как было показано в 19 веке У. Гамильтоном и М.В. Остроградским, величина действия любого реального движения материальной системы имеет экстремальное значение. Следовательно, величина действия в безразмерном виде носит критериальный характер. Энергия криволинейного движения частицы обеспечивается потоком. Для получения безразмерного энергетического параметра, характеризующего момент сепарации частиц с линии тока, т.е. момент, когда энергии потока становится недостаточно для удержания частиц на линии тока и продолжения их криволинейного движения, необходимо составить отношение действий источника энергии – движущегося потока, и потребителя энергии – движущейся частицы. В соответствии с принципом Остроградского-Гамильтона такое отношение для свершившегося движения, например, для корректных результатов опытных испытаний тех или иных очистных устройств, будет иметь минимальное значение. Этот принцип может быть применен, в частности, к результатам паспортных испытаний отечественных конструкций циклонов и

вихревых аппаратов заводами-изготовителями, на основании которых составлялись их каталожные характеристики и выполнялись проектные расчеты [150, 151].

Для нахождения энергетического параметра частицы f_{Rp} воспользуемся, как и для потока, уравнением радиального градиента действующей на частицу центробежной силы F_1 , приняв его постоянным. Также для упрощения примем форму частицы сферической. Такое упрощение вполне приемлемо для взвешенных частиц реальных производственных выбросов, имеющих, за редким исключением, компактную форму. Как следует из сведений по морфологии промышленной пыли, на сотню ее видов приходится не более 7-8 видов, содержащих отдельные включения игольчатых или чешуйчатых частиц, и не более 2-3 видов, состоящих в основном из частиц некомпактной формы [152, 153]. При использовании полученных далее результатов для сепарации пыли с отдельными включениями некомпактных частиц можно ввести поправку на обычно используемый в таких случаях коэффициент формы, определенный, например, в [154] как «площадь поверхности сферы, объем которой равен объему частицы, отнесенная к площади поверхности частицы». Для вычисления эффективности осаждения оставшихся 2-3 видов пыли понадобится дополнительная опытная корректировка результатов данного исследования. С учетом отмеченного, для частицы диаметром D_p и плотностью ρ_p :

$$f_{Rp} = dF_1/dR_2 = F_1/R_2 = \frac{(m_p - m_G) du}{R_2 d\tau} = \frac{\pi(\rho_p - \rho_G) D_p^3 u_0^2}{6R_2^2} \text{ Па}\cdot\text{м.} \quad (2.59)$$

При составлении уравнения (2.59) учтена для корректности масса m_G измещенного частицей объема газа. Это уточнение не превышает десятых долей процента при пневмотранспорте низкоплотных измельченных материалов, например, пенополиуретановой крошки, а для обычной промышленной пыли ничтожно мало. Однако данная поправка существенна для устройств очистки жидких сред.

При определении удельного действия частицы a_p необходимо учесть участие частицы во вращательном движении потока в циклоне. Действие потока на частицы начинается с вовлечения их потоком в свое движение и осуществляется за счет сообщенной нагнетателем энергии. При отсутствии электрических и др. полей воздействие потока на частицу в основном реализуется через вязкость, т.е. через зацепления и удары его молекул о поверхность частицы. Под их действием частица может приобрести скорость и направление, совпадающие со средней скоростью и направлением окружающих молекул, т.е. с параметрами несущей частицу линии тока, или же передаваемый импульс может оказаться недостаточным. Таким образом, вязкость

является одним из факторов, определяющих интенсивность процесса вовлечения частицы в движение потока. Для ее учета используем известный параметр τ_w – время, необходимое для сближения скорости частицы и потока до полного совпадения по модулю и направлению (время релаксации). Его получают из решения уравнения движения частицы под действием силы сопротивления F_ζ . В условиях, соответствующих формуле Стокса $F_\zeta = -3\eta\pi D_p w$, уравнение движения сферической частицы в газовом потоке представляют в виде $dw/d\tau + 18\eta w / [(\rho_p - \rho_G) D_p^2] = 0$. Это линейное однородное уравнение первого порядка, решение которого имеет вид экспоненты $w = w_0 \exp[-\tau \cdot 18\eta D_p^{-2} / (\rho_p - \rho_G)]$, показатель степени которой, очевидно, безразмерен. Его дробная часть, имеющая размерность времени, и представляет собой время релаксации $\tau_w = (\rho_p - \rho_G) D_p^2 / (18\eta)$. Параметр τ_w имеет физический смысл отношения (удельного) момента инерции частицы единичного объема $(\rho_p - \rho_G) D_p^2$, кг·м²/м³, к (удельному) действию, производимому единицей объема потока η , Дж·с/м³. Следовательно, τ_w есть время, за которое действие потока (или его энергия как производная действия по времени) преодолевает инерцию оказавшейся в нем частицы и вовлекает ее в совместное действие – движение. Таким образом, величина τ_w отражает влияние массы, формы и размеров частицы на изменение ее скорости в потоке с вязкостью η , и может быть использована как характерный параметр при определении удельного действия a_p частицы, вовлеченной потоком в движение. Поэтому в качестве скоростного масштаба выберем скорость, характеризующую зависимость сил инерции и сопротивления от параметров частицы и потока:

$$u_{p\tau_w} = D_p / \tau_w = \rho_p D_p / (18\eta) \text{ м/с.} \quad (2.60)$$

Это скорость, с которой частица проходила бы расстояние, равное ее диаметру, за время релаксации. Ее порядок составляет для мелких частиц ($10^0 \dots 10^{-1}$) м/с, для средних и крупных – ($10^{-2} \dots 10^{-3}$) м/с. Итак,

$$a_p = f_{Rp} / u_{p\tau_w} = 3\pi\eta (u_0 \tau_w / R_2)^2, \text{ Па} \cdot \text{с.} \quad (2.61)$$

Выражение $u_0 \tau_w / R_2$ в (2.61) безразмерно. Оно имеет структуру числа Рейнольдса и представляет инерционные свойства сферической частицы и силы сопротивления, которые она

преодолевают, вовлекаясь потоком в криволинейное движение с радиусом кривизны R_2 . Обозначим как инерционное число Рейнольдса для частиц

$$\text{Re}_p^{in} = \sqrt{3\pi} u_0 \tau_w / R_2. \quad (2.62)$$

Тогда отношение a_p к масштабу действия η в виде квадрата инерционного числа Рейнольдса будет представлять собой безразмерную характеристику действия частицы:

$$a_p / \eta = 3\pi (u_0 \tau_w / R_2)^2 = (\text{Re}_p^{in})^2. \quad (2.63)$$

Возможность сепарации частицы вследствие того, что во вращающемся потоке с радиусом закругления R_2 она не может следовать за линией тока и по инерции продолжит движение в направлении касательной к ней, может быть выражена соотношением действий частицы и потока через специфические числа Рейнольдса:

$$\frac{(\text{Re}_p^{in})^2}{\text{Re}_c} = \frac{12\pi\eta (u_0 \tau_w / R_2)^2}{\rho_G u_0 (R_2^{0.5} + R_1^{0.5})^2} \cong \frac{u_0 (\rho_p - \rho_G)^2 D_p^4}{27\rho_G R_2^3 \eta}. \quad (2.64)$$

В выводе для определенности принят соответствующий ряду отечественных типов циклонов конструктивный параметр $R_1/R_2 = 0,59$. При другом соотношении R_1/R_2 изменится численный коэффициент в знаменателе (2.64), а комплекс

$$u_0 (\rho_p - \rho_G)^2 D_p^4 / \rho_G R_2^3 \eta \equiv \text{Re}_r. \quad (2.65)$$

останется прежним. Он также имеет структуру безразмерного комплекса, соответствующего числу Рейнольдса, и составлен посредством комбинации безразмерных параметров, выражающих соотношение энергий и действий частицы и вращающегося потока. Поэтому в криволинейных (вращающихся, вихревых) потоках численные значения комплекса Re_r должны соответствовать степени осаждения частиц и могут использоваться для ее оценки в сходственных условиях.

Для проверки работоспособности безразмерного комплекса Re_r , полученного теоретическим путем, проведена его проверка на основании опытных данных по 11 типам возвратно-поточных циклонов отечественного производства, широко использующихся до настоящего времени для очистки промышленных выбросов. Все они характеризуются наличием на входе кольцевого канала без центрального стока, т.е. соответствуют выбранной модели вращения потока (1.40). Ранее было показано, что использованные при теоретическом обосновании модели упрощения могут внести в конечный результат погрешность в пределах нескольких процентов, что значительно меньше погрешностей опытных замеров.

Покажем здесь дополнительно, что пренебрежение в теоретической модели влиянием турбулентности не должно сказываться на адекватности описания свойств реального процесса сепарации не только по причине выявленного ранее соответствия математической модели гидродинамическому характеру движения потока, но и вследствие заметного ослабления энергии вихрей в дисперсных газовых потоках. Проведем для этого оценку размеров частиц, которые могут взаимодействовать с пульсациями (вихрями) в потоке гетерогенных выбросов, перемещающихся канале, сравнивая временной масштаб турбулентности τ_0 , т.е. время существования вихрей, с τ_w . Правомерность сопоставления параметра, характеризующего турбулентность в целом, с характеристикой движения частиц в ламинарном потоке, заключается в том, что масштаб турбулентности является еще и характеристикой усредненного вихря, т.е. отдельного простого образования в потоке, не содержащего вихрей внутри себя. Известно, что в развитом турбулентном потоке, движущемся в канале размером D , масштаб основной части вихрей (несущих основную часть турбулентной энергии) имеет порядок $0,05D$, а их скорость сравнима со средней скоростью потока w_G . В канале размером $D = 200$ мм, при динамическом коэффициенте вязкости газовой среды $\eta = 17,3 \cdot 10^{-6}$ Па·с и плотности $\rho = 1,293$ кг/м³ скорость потока w_G , соответствующая движению с $Re = 12000$, и временной масштаб турбулентности τ_0 составят: $w_G = \eta Re / (D\rho) \approx 0,8$ м/с, $\tau_0 \approx 0,05D / w_G \approx 12,5 \cdot 10^{-3}$ с. Диаметр частиц, имеющих при плотности материала частиц $\rho_p = 1500$ кг/м³ такое же время релаксации ($\tau_w = \tau_0 = 12,5 \cdot 10^{-3}$ с): $D_p = \sqrt{\tau_w \cdot 18\eta / \rho_p} \approx 50 \cdot 10^{-6}$ м. Полученный результат показывает, что в каналах с размерами 200 мм пульсации потока будут влиять на частицы с размерами до 50 мкм включительно, т.е. на основную часть пыли производственных выбросов. Однако с пульсациями молей газового потока по амплитуде, частоте и скорости будут совпадать пульсации частиц очень узкого интервала размеров. Так, в рассмотренном примере частоты пульсаций взвешенных в потоке частиц размером до 50 мкм будут выше, а частиц размером более 50 мкм – ниже средней частоты пульсации турбулентных молей. Характер несовпадения пульсаций частиц и потока в основном зависит от дисперсного состава (от отношения размеров

и времени релаксации частиц к линейному и временному масштабам турбулентности), а также от концентрации пыли. Из-за возникающего «диссонанса» параметров колебания частиц с пульсациями газовых молей в запыленных газовых потоках может происходить интенсивная диссипация энергии вихрей и «гашение» турбулентности. Поэтому турбулентность в той мере, в какой она может иметь место при вращении запыленного потока в кольцевом сечении реального циклона, не потребует внесения какого-либо существенного изменения в соответствующую выражению (2.65) структуру параметра Re_r .

В принципе, аналогичный комплекс может использоваться и для оценки эффективности очистки газовых выбросов прямоточными вихревыми аппаратами. Однако необходимо учесть, что для аппаратов с центральным стоком следует принять свою математическую форму модели вращения потока. Показатель степени k в ней, по опытным данным различных исследователей, значительно отличается от 0,5. Необходимо заметить также, что полученный комплекс может использоваться и при плотностях очищаемой среды, сопоставимых с плотностью отделяемой примеси [155, 156, 157].

Отметим, что в структуре комплекса Re_r содержится только один геометрический параметр аппарата R_2 . Это связано с тем, что при выводе выражения (2.65) были приняты за основу конструктивные параметры серийно выпускаемых типов циклонных пылеосадителей. У этих аппаратов соотношение конструктивных характеристик близко к оптимальному, т.к. найдено в результате многочисленных опытных испытаний в различных исследовательских коллективах, и последующей доводки в течение длительного срока эксплуатации. В настоящее время конструктивные размеры большинства нашедших широкое применение в промышленности отечественных и зарубежных типов циклонов, в т.ч. диаметры средней линии и выхлопной трубы, высота цилиндрической части, определяются в долях от внутреннего диаметра цилиндрической части корпуса (см. каталоги очистного оборудования или справочные издания, например, [43, 58, 153, 158]). Поэтому через величину R_2 задается соответствие оптимальной очистке других конструктивных характеристик таких аппаратов, в т.ч. и размеров, определяющих время пребывания потока в них. Для новых конструкций с произвольным соотношением размеров элементов, а также использующих особые элементы или специфичные эффекты осаждения, необходимо уточнение численного коэффициента в (2.64) и сопоставление с опытными коэффициентами очистки.

Соответствие чисел Re_r степеням осаждения в сепараторах циклонного типа может быть установлено по аппаратам с достоверно известными характеристиками степени очистки выбросов. Так, например, для одного из наиболее распространенных типов циклонов – ЦН-15 с табличными значениями всех конструктивных и эксплуатационных параметров (диаметр

корпуса $D=600$ мм, скорость потока на входе $u_0=3,5$ м/с, плотность частиц $\rho_p= 1930$ кг/м³, вязкость газа $\eta=22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с) известны характеристики степени осаждения частиц (по [158]): $D_{50} = 4,5 \cdot 10^{-6}$ м, логарифм дисперсии размеров улавливаемых частиц $\lg \sigma_\eta = 0,352$. При плотности выбросов $\rho_G = 1,293$ кг/м³, дисперсии размеров взвешенных частиц $\sigma_p = 2,2$ для степени очистки 99% параметр осаждения $x = 2,4$ ([58]). Значение медианного диаметра D_m частиц, улавливаемых на 99%, полученное из соотношения [58]:

$$x = \lg(D_m/D_{50}) / \sqrt{(\lg \sigma_\eta)^2 + (\lg \sigma_p)^2}, \quad (2.66)$$

составит $70 \cdot 10^{-6}$ м.

Проведены расчеты относительных чисел Рейнольдса Re_r для 11 типов циклонов отечественных конструкций в интервалах размеров частиц $D_p = (2 \dots 150) \cdot 10^{-6}$ м, скорости потока на входе $u_0=(1 \dots 14)$ м/с и табличных значениях остальных параметров. Некоторые типовые результаты приведены ниже на графиках рис. 2.1, рис. 2.2, рис. 2.3 и в таблице (таблица 2.1).

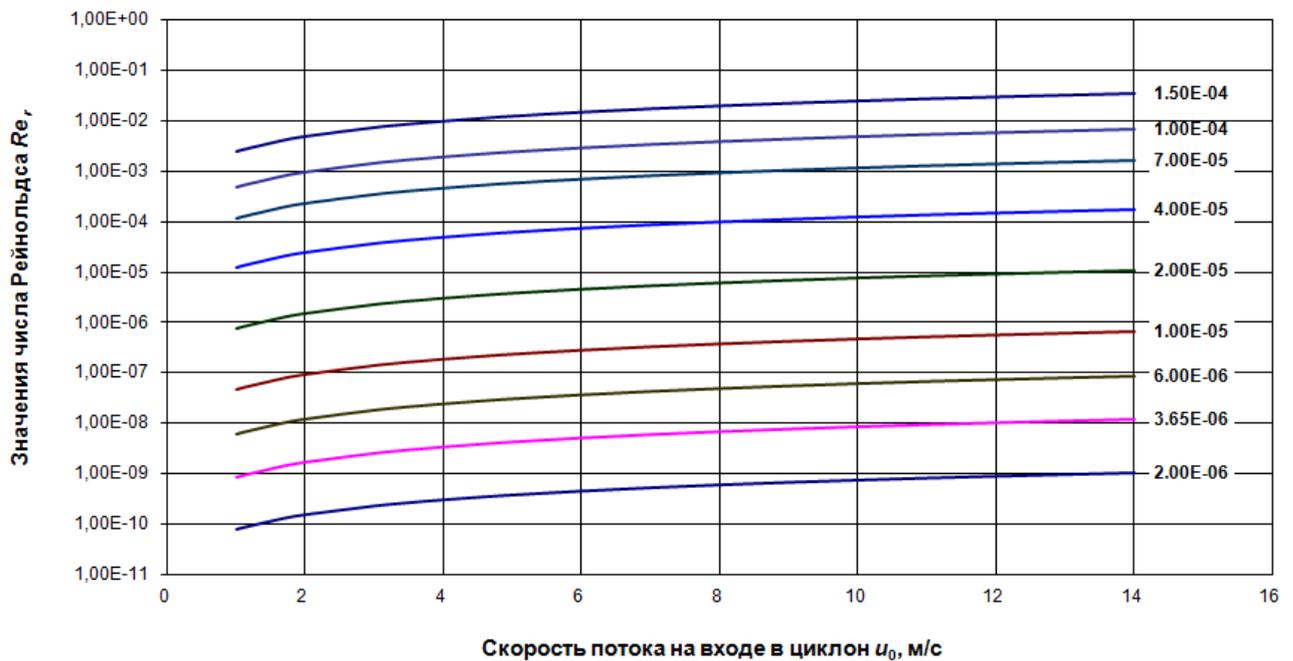


Рис. 2.1 Зависимость числа Re_r от скорости потока на входе в циклон ЦН-15 для частиц диаметром $D_p = (2 \dots 150) \cdot 10^{-6}$ м (размеры частиц, м, указаны в подписях рядов данных)

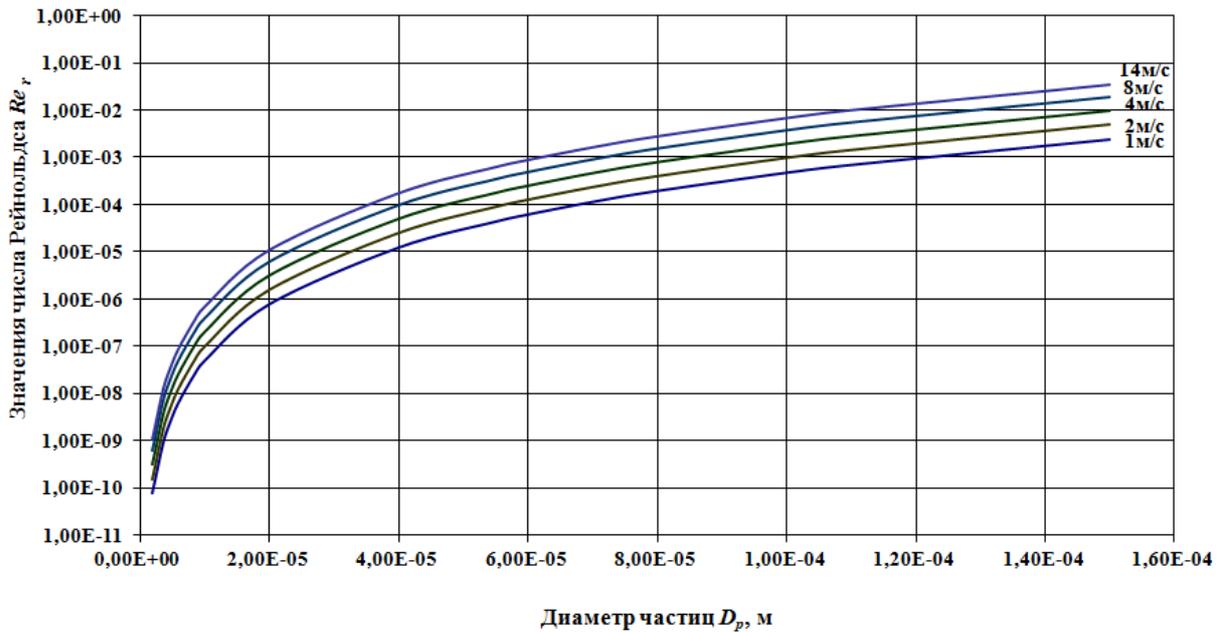


Рис. 2.2 Зависимость числа Рейнольдса Re_r от размеров частиц D_p при скорости потока на входе в циклон ЦН-15 $u_0 = 1 \dots 14$ м/с (указана в подписях рядов данных)

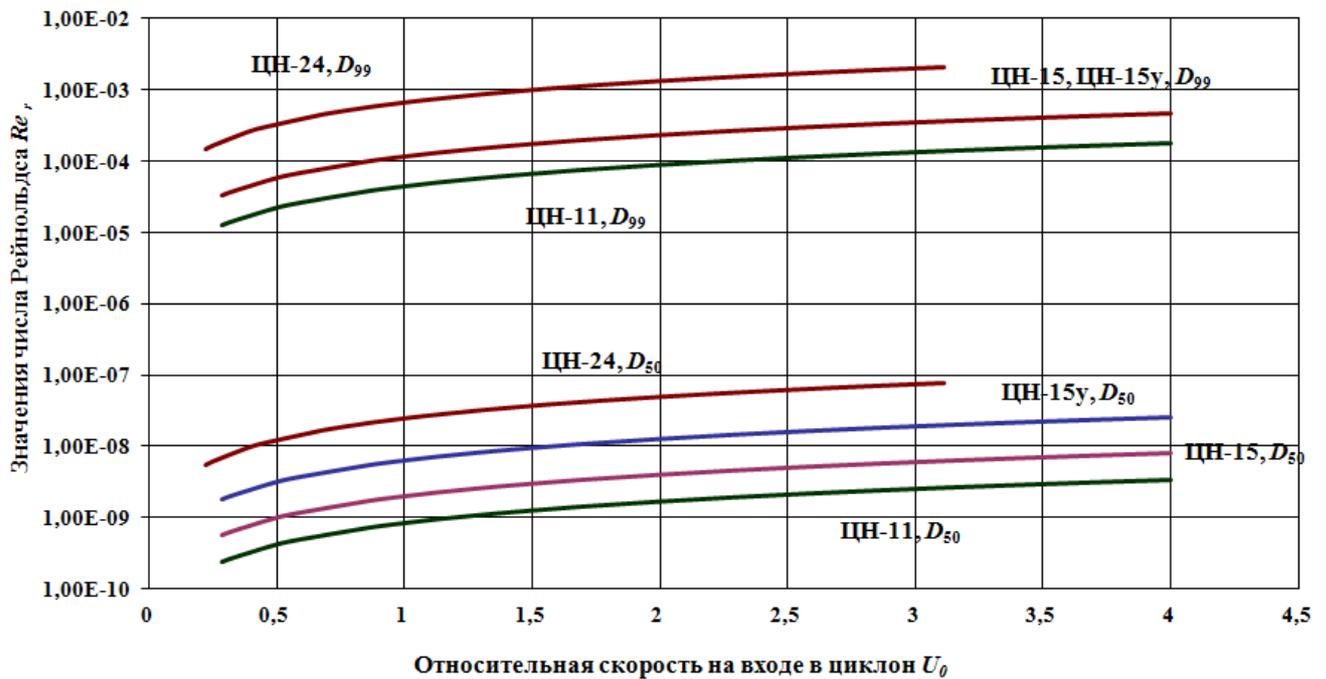


Рис. 2.3 Значения Re_r для частиц с размером, соответствующим 50%-й (D_{50} , м) и 99%-й (D_{99} , м) очистке в циклонах ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24.

Зависимости Re_r аналогичны для всех типоразмеров одной разновидности циклонов типа ЦН. При условии принятия модели вращения потока, соответствующей выражению (1.40), для всех разновидностей циклонов ЦН, для них близки и значения $Re_{r,99}$. Исключение составляет модификация ЦН-24, имеющая заведомо худшие показатели и значительно меньшие

энергозатраты. Вместе с тем при этом прослеживается определенно выраженная зависимость от энергозатрат: с увеличением сопротивления величина $Re_{r,99}$ уменьшается, что можно видеть по модификации ЦН-24, имеющей значительно меньшие энергозатраты. Заметим при этом, что в структуре Re_r коэффициент гидравлического сопротивления циклона ζ не содержится.

Таблица 2.1. Относительные числа Рейнольдса Re_r для циклонов ЦН-15

Циклон	ζ	$w_{opt}, \text{м/с}$	$D_{50} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$Re_{r,50}$	$\lg \sigma_{\zeta}$	x	$D_{99} \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$Re_{r,99}$
ЦН-24	80	4,5	8,5	1,13E-07	0,308	2,4	108	2,94E-03
ЦН-15	163	3,5	4,5	6,90E-09	0,352	2,4	70	4,04E-04
ЦН-15у	170	3,5	6	2,18E-08	0,283	2,4	70	4,04E-04
ЦН-11	250	3,5	3,65	2,99E-09	0,352	2,4	55	1,54E-04

Результаты расчетов чисел Re_r для частиц с $D_p = (1,13 \dots 114,6) \cdot 10^{-6}$ м, соответствующих 50 и 99%-ной очистке в циклонах типа СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М, СИОТ, ВЦНИИОТ, Ц, Клайпеда, при скорости потока на входе $u_0 = 1 \dots 14$ м/с, включающей оптимальную, и табличных значениях остальных параметров, представлены на рис. 2.4, рис. 2.5.

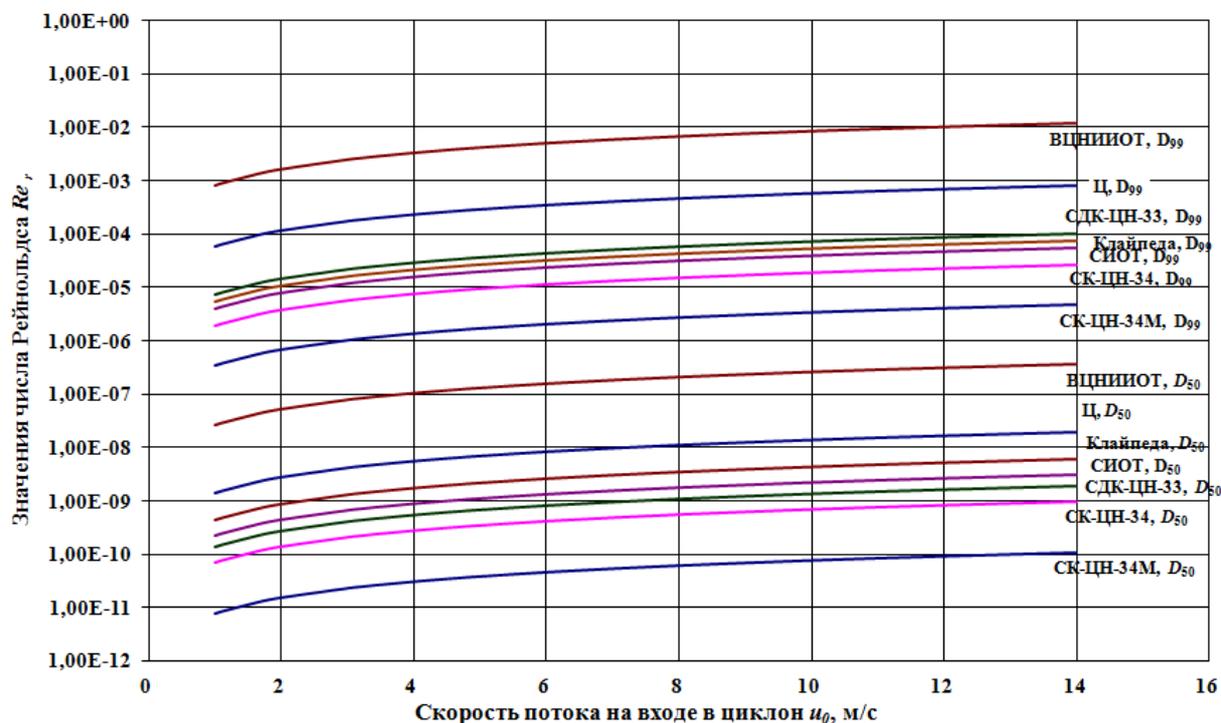


Рис. 2.4 Зависимость Re_r для других типов циклонов от скорости потока на входе в пределах $u_0 = 1 \dots 14$ м/с

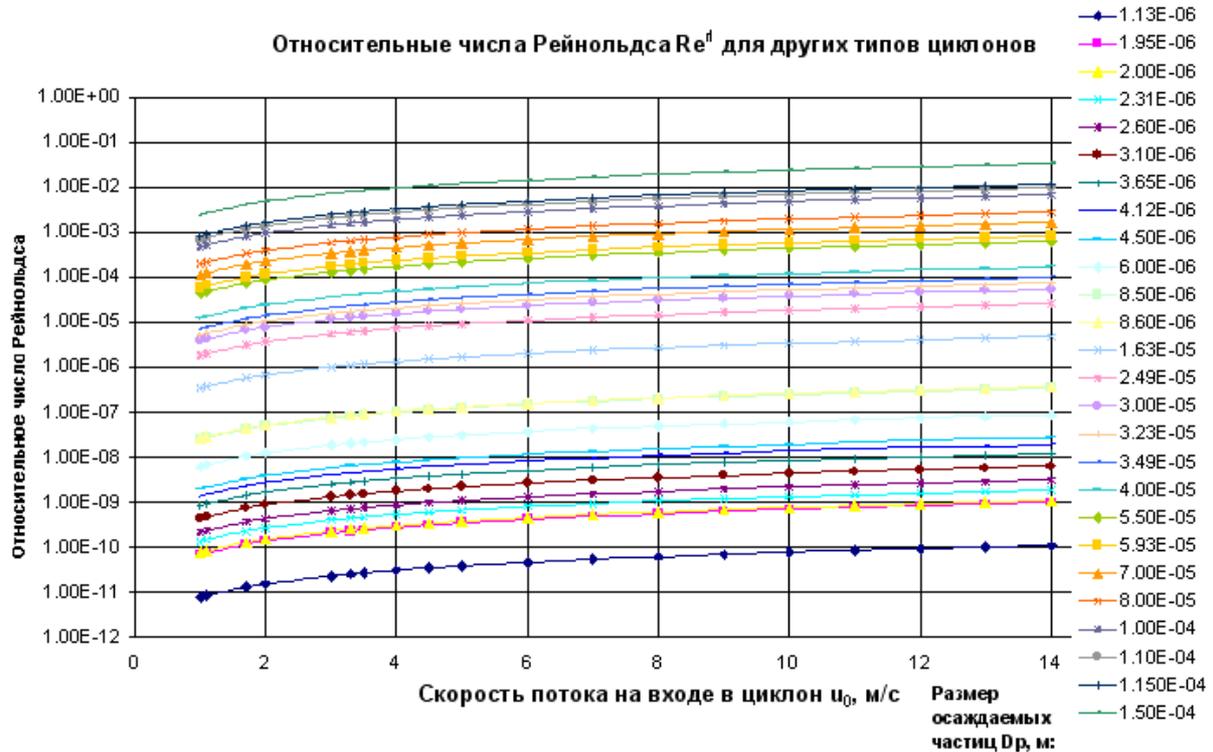


Рис. 2.5 Значения Re_r для частиц с размером, соответствующим 50%-ной (D_{50} , м) и 99%-ной (D_{99} , м) очистке в циклонах типа СК-ЦН-34М, СК-ЦН-34, СИОТ, Клайпеда, СДК-ЦН-33, Ц, ВЦНИИОТ

Результаты расчетов Re_r для ряда других типов циклонов показали следующее. Как и для циклонов ЦН-15 и ЦН-24, прослеживается четкая зависимость величины $Re_{r,99}$ от энергозатрат: с увеличением сопротивления, которое пропорционально ζw^2 , величина $Re_{r,99}$ уменьшается. Так например, циклон ВЦНИИОТ, имеющий самый низкий коэффициент сопротивления, при оптимальной скорости потока может обеспечить осаждение частиц, параметр Re_r которых не ниже $1,05 \cdot 10^{-7}$, а 99%-ную – только крупных частиц с параметром Re_r выше $3,3 \cdot 10^{-3}$.

Для всех типов циклонов существует корреляция Re_r с затратой энергии в аппарате. С ее увеличением значения Re_r , соответствующие 50%-ной и 99%-ной очистке, снижаются. При этом однозначность сопоставления Re_r и ζ соблюдается, если ζ существенно различаются. Это можно видеть по аппаратам ВЦНИИОТ ($\zeta = 75$) и СК-ЦН-34М ($\zeta = 2800$). Циклон ВЦНИИОТ при $w_{opt} = 4$ м/с может обеспечить 50%-ное осаждение частиц с параметром $Re_r \geq 1,05 \cdot 10^{-7}$, а 99%-ное – только крупных частиц с $Re_r \geq 3,3 \cdot 10^{-3}$.

Обработка данных по степени осаждения частиц показала наилучшее соответствие Re_r энергетической характеристике ζw_{opt} . Далее по ней была проведена тарировка для получения критических значений чисел Re_r циклонных устройств.

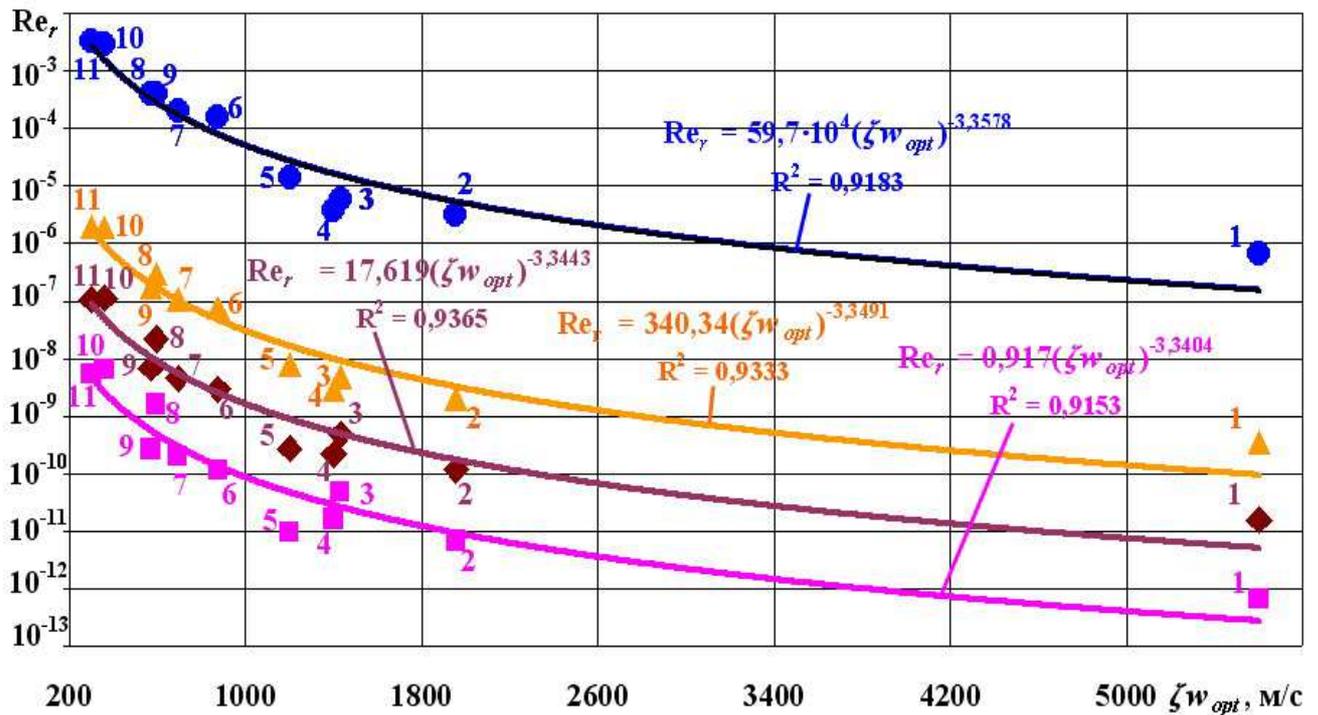
Тарировка числа Re_r на основе энергетического параметра ζw_{opt} 

Рис. 2.6 Критические числа Re_r для степеней осаждения частиц η , % (■ – 15,84%; ◆ – 50%; ▲ – 84,16%; ● – 99%); тарировка по паспортным значениям энергетического параметра ζw_{opt} для циклонов: 1 – СК-ЦН-34М; 2 – СК-ЦН-34; 3 – Клайпеда; 4 – СИОТ; 5 – СДК-ЦН-33; 6 – ЦН-11; 7 – Ц; 8 – ЦН-15У; 9 – ЦН-15; 10 – ЦН-24; 11 – ВЦНИИОТ

Числа Re_r позволяют оценивать возможность обеспечения требуемой степени осаждения частиц в исследуемом аппарате по минимальной скорости потока и соответствующим затратам энергии. Можно также определять приемлемые диапазоны работы существующих аппаратов. По рис. 2.4, рис. 2.5, рис. 2.6 можно определить, например, что в циклоне СК-ЦН-34М при $w_{opt} = 2$ м/с частицы размером 8,6 мкм будут осаждаться на 99%, что вполне приемлемо для практического использования.

Итак, для представленных выше аппаратов, охватывающих практически все широко используемые по РФ на настоящее время типы циклонов, в пределах допустимого отклонения ($\pm 15\%$) скорости очищаемого потока в циклоне от табличного значения оптимальной скорости w_{opt} , имеет место корреляция (с величиной достоверности аппроксимации более 91%) между значениями Re_r и степенью осаждения η_s взвешенных частиц по соотношению:

$$2.67 Re_{r\eta_s} = C(\zeta w_{opt})^n, \quad (2.67)$$

где C , n – параметры, значения которых приведены в таблице: таблица 2.2.

К примеру, по рис. 2.6 можно видеть, что для циклона возвратно-поточного типа с паспортным значением энергетического параметра $\zeta_{w_{opt}}=3200$ критическое число Re_r составляет 10^{-6} . Это означает, что частицы с $Re_r = 10^{-6}$ и выше будут осаждаться в данном циклоне на 99%, а с числами Re_r меньше 10^{-6} такой степени осаждения не достигнут.

Таблица 2.2.

Параметры C , n корреляционного соотношения между значениями Re_r и степенью осаждения

Степень осаждения η , %	C	n
15,84	0,917	-3,3404
50	17,62	-3,3443
84,16	340,3	-3,3491
99	$5,97 \cdot 10^5$	-3,3578

В соответствии с полученным результатом разработана программа (приложение 1), позволяющая проводить численные исследования конструируемых аппаратов и выполнять поверочные расчеты с целью выбора из существующих конструкций аппаратов, обеспечивающих требуемую степень очистки с минимумом энергетических затрат.

Степень осаждения частиц одного размера будет выше в том циклоне, который может обеспечить при оптимальной скорости более высокое значение числа Re_r . Соответственно, при оптимальной скорости для данного циклона степень осаждения частиц разного размера будет расти с увеличением их числа Re_r . Безразмерный комплекс Re_r по (2.65) позволяет также легко определить, при какой скорости потока можно обеспечить требуемый процент улавливания частиц, у которых при оптимальной скорости Re_r ниже, чем обеспечивается данным типом циклона. Так, обеспечивать в циклоне ВЦНИИОТ 99%-ную очистку частиц размером 8,6 мкм, имеющих при оптимальной для этого циклона скорости значение числа $Re_r = 1,05 \cdot 10^{-7}$, оказалось бы возможно только при увеличении скорости потока на 4 порядка, что нереально.

В соответствии с проведенными исследованиями, численные значения Re_r коррелируют со степенью осаждения взвеси в сепараторах различных конструкций, реализующих вращательное движение многофазных потоков. Приложение данного метода расчетного определения степени очистки взвесей проработано в первом приближении также к сепарации частиц, диспергированных в жидкостях ([156, 157], приложение П1). Показана возможность применения числа Re_r для нахождения конструктивных характеристик аппаратов с вращающимся потоком при различных сочетаниях фаз.

Проведенные в данном разделе исследования показывают, что параметр Re_r позволяет находить численные значения основных характеристик циклонов и других сепараторов с вращательным движением многофазных потоков расчетным путем. Несмотря на конструктивные различия рассмотренных аппаратов, их расчеты на основе Re_r приводят к результатам, близким к опытным. При помощи числа Re_r для аппаратов вихревого типа могут вычисляться фракционные коэффициенты очистки примеси в зависимости от параметров потока и одного конструктивного параметра аппарата, определяющего радиус кривизны потока.

2.3.2 Сепарация частиц золы на препятствиях

Принципиально аналогично осаждению в циклонах происходит и инерционное осаждение частиц на препятствиях, создаваемых в потоке элементами пористых слоев. Пористые слои формируются в потоке системой препятствий в виде решеток (жалюзийные золоуловители), зерен различной формы (зернистые фильтры), сеток (сетчатые, тканевые, волокнистые фильтры), с осевшей на этих препятствиях золой, пылью. Каналы в пористых слоях специально не формируются. Они имеют различные размеры и формы, и могут заканчиваться тупиками. При соответствующем перепаде давления молекулы газового потока могут огибать препятствия любого радиуса кривизны и проходить через каналы любого размера в слое, а дисперсная часть с размерами более $\sim 0,5$ мкм задерживается, так как не может вследствие своей инерционности обойти препятствие или превышает размер канала и застревает в нем. Таким образом, результаты существующих теоретических и опытных исследований по инерционному захвату могут быть использованы для проверки универсальности использования числа Re_r . При этом следует иметь в виду, что процесс улавливания частиц препятствием обусловлен не только столкновением, но и дальнейшим удержанием частиц на препятствиях.

Подчеркнем также важное следствие, которое практически не учитывается в современных теориях. Представим для этого число Стокса в виде:

$$Stk \equiv \frac{2}{9} \frac{r_p}{R_{ob}} \frac{\rho_p}{\rho_G} \frac{u_\infty r_p \rho_G}{\eta} = \frac{2}{9} \frac{r_p}{R_{ob}} \frac{\rho_p}{\rho_G} Re_p \quad (2.68)$$

Комплекс Stk имеет смысл отношения удельного (на единицу объема дисперсной части) действия $\rho_p u_\infty r_p$, которое способна совершить частица в невозмущенном потоке, к удельному (на единицу объема газовой среды) действию η , необходимому для преодоления сопротивления среды. Он содержит еще безразмерные симплексы для частицы (инерционный ρ_p/ρ_G и геометрический r_p/R_{ob}), масштабами которых служат параметры газового потока и препятствия

в нем, т.е. объектов, взаимодействующих с частицей. Следовательно, критерий Stk можно рассматривать как критерий Рейнольдса для частицы Re_p (т.е. отношение удельного действия дисперсной и газовой части потока), приведенный к инерционному и геометрическому масштабам конкретной системы. При этом для характеристики понятия действия частицы может быть использована интерпретация «безразмерного параметра инерции» по [43] (представляющего собой Stk с поправкой Каннингхема) как длины пробега частицы, введенной со скоростью u_∞ в неподвижный объем газа.

Сравнение параметров Re_r и Stk показывает их сходство и специфические отличия. Как и число Стокса, Re_r можно представить через Re_p :

$$Re_r = Re_p \cdot \frac{16r_p J_p}{R_2 J_G}, \quad (2.69)$$

где

$$J_p = r_p^2 \rho_p V_p - \quad (2.70)$$

момент инерции частицы при ее повороте вокруг своей оси, m^2/kg ;

$$J_G = R_2^2 \rho_G V_p - \quad (2.71)$$

момент инерции условной частицы с плотностью, равной плотности газа, при ее криволинейном движении с радиусом кривизны R_2 , m^2/kg .

Комплекс Re_r соответствует комплексу Re_p (т.е. отношению удельного действия дисперсной и газовой части потока), приведенному, как и Stk , к инерционному и геометрическому масштабу конкретной системы. Одним специфическим отличием здесь является то, что геометрическое масштабирование произведено не по размеру препятствия, а по радиусу кривизны R_2 линии тока, обходящей препятствие. Другое отличие в том, что инерционным масштабам служит не масса, а момент инерции. При этом за единичный принят момент инерции J_G условной частицы – элемента газового потока, обходящего препятствие по линии тока с радиусом кривизны R_2 . Таким образом, здесь отражается специфика рассматриваемой конкретной системы, заключающаяся в описании криволинейного движения частицы. Известно, что соотношения, соответствующие поступательному движению, будут описывать вращательное движение, если линейную скорость и ускорение заменить угловыми, массу – моментом инерции относительно оси вращательного движения, силу – моментом силы [159].

Таким образом, как и число Стокса, Re_r также содержит безразмерные инерционный J_p/J_G и геометрический r_p/R_2 симплексы для частицы. Однако в отличие от числа Стокса они служат характеристиками движения частицы по криволинейной траектории.

В таком виде Re_r качественно согласуется с интегральным параметром крутки, который может быть представлен как отношение момента количества движения к произведению количества движения на радиус поворота, т.е. при постоянной плотности и составляющих скорости потока-отношению квадратов радиусов, умноженному на тангенс угла крутки потока (по [160]).

В [57] приводится также выражение для оценки степени осаждения на шаре в режиме вязкого обтекания:

$$\eta_{Stk} = \left(1 + \frac{0,77 \ln(4Stk)}{2Stk - 1.214} \right)^2 \quad (2.72)$$

При потенциальном режиме по [57] степень осаждения на цилиндре оценивают по эмпирическому выражению

$$\eta_{Stk} = \frac{Stk^3}{Stk^3 + 1,54Stk^2 + 1,76}, \quad (2.73)$$

на шаре – по выражению

$$\eta_{Stk} = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,125)^2}. \quad (2.74)$$

В то же время по [43] при $Stk > 0,2$, т.е. для переходного и потенциального режима, для шара можно использовать выражение

$$\eta_{Stk} = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,7)^2}. \quad (2.75)$$

2.4 Совершенствование расчетов конденсационной обработки выбросов помещений КРУЭ для удаления галогенсодержащего компонента SF₆

Типовые методики конструктивных и поверочных расчетов конденсаторов не могут быть использованы для определения геометрических размеров (площади поверхности теплообмена) расходов и температурных режимов теплоносителей для теплообменника, в котором предполагается обработка газовой среды с целью конденсации содержащихся в ней гомогенных загрязнителей.

Разработана и предложена нижеследующая схема расчета конденсаторов для обработки газовых выбросов с целью конденсации многокомпонентных паров из потока неконденсирующихся газов.

1. По заданным концентрациям паров загрязнителей и температуре t газовых выбросов подсчитывают парциальные давления ингредиентов, оценивают их агрегатные состояния, определяют возможность применения в расчетах законов идеальных или реальных газовых смесей, других соотношений.

2. Подсчитывают массовые W_{ga} и объемные W_{va} расходы отбросных газов в целом и по ингредиентам – выбросов (W_{gar}, W_{var}), дымовых газов (W_{fg}, W_{vfg}), компонентов загрязнителей (W_{gi}, W_{vi}).

3. Задаются температурными характеристиками процесса. В отличие от конденсации однокомпонентного пара температура конденсации паров смеси веществ не остается постоянной вследствие изменения концентраций ингредиентов. Учет характеристик всех компонентов значительно увеличивает трудоемкость расчетов, и поэтому при выборе начальной t_b и конечной t_e температур конденсации основываются на их минимальном количестве, чаще – на одном.

Если в составе загрязнителей можно выделить основной компонент (порядка 60...90% массы смеси), t_b можно принять по его свойствам, а наличие остальных компонентов учитывать аддитивной корректировкой его физико-химических свойств. Если же компоненты смеси загрязнителей имеют приблизительно одинаковые концентрации и все подлежат удалению, расчеты могут быть проведены по наименее благоприятному варианту – компоненту с наименьшей температурой конденсации. Конечную температуру конденсации t_e принимают по конечному парциальному давлению расчетного компонента, соответствующему требуемой полной η_{tot} или парциальной η_i степени очистки. По значениям t_b и t_e подбирают вид хладоносителя, задаются его начальной t' и конечной t'' температурами. На процесс конденсации отдельных компонентов из потока выбросов существенно влияют направления токов хладоносителя и отбросных газов (противоток или перекрестный ток). Температура конденсации непрерывно снижается вследствие уменьшения количества удаляемых компонентов, а при невысокой концентрации конденсирующихся паров процесс в большей степени определяется теплообменом хладоносителя и газового потока, чем теплоотдачей от конденсирующихся загрязнителей. В типовых расчетах выбору схем движения потоков не придается особого значения ввиду постоянства температуры конденсации.

4. Определение количества тепла, отводимого от отбросных газов, при конденсации паров загрязнителей.

Как правило, отбросные газы поступают на конденсационную обработку с температурой, соответствующей перегретому состоянию паров загрязнителей. Охлаждение таких газов всегда сопровождается конденсацией некоторой части паров на поверхностях теплообмена еще до достижения температуры насыщения всего объема [161]. Однако математических зависимостей для учета этого явления нет, и поэтому для решения задачи приходится упрощенно делить процесс на две стадии: охлаждение газового потока без конденсации от заданной температуры t_a до температуры начала конденсации t_b , и последующее охлаждение с конденсацией до температуры t_e . Количество тепла, Вт, отводимое на первой (Q_I) и второй (Q_{II}) стадиях, составит:

$$Q_I = \left(W_{ga} c_{pa} + \sum_{i=1}^N W_{gi} c_{pi} \right) (t_a - t_b); \quad (2.76)$$

$$Q_{II} = \left(W_{ga} c_{pa} + \sum_{i=1}^N W_{gi} c_{pi} \right) (t_b - t_e) + \sum_{i=1}^N W_{gi} I_i^{ev} \vartheta_i, \quad (2.77)$$

где c_{pa} , c_{pi} – средние теплоемкости, Дж/(кг·К), выбросов (или неконденсирующейся части отбросных газов) и паров загрязнителей; I_i^{ev} – средняя энтальпия конденсации i -го компонента паров загрязнителей, Дж/кг; ϑ_i – глубина извлечения i -го компонента загрязнителей (в долях); N – число компонентов конденсирующихся загрязнителей.

В формулах (2.76, 2.77) значения физических свойств принимаются при средних температурах соответствующих температурных интервалов.

5. В отличие от типовой методики, необходимо найти приближенное значение промежуточной температуры теплоносителя t_{be} , распределив его температурный перепад ($t'' - t'$) пропорционально величинам Q_I и Q_{II} (

Рис. 2.7). Это позволяет определить значения среднелогарифмических температурных напоров Δt_{mI} , Δt_{mII} на первой и второй стадиях обработки выбросов.

$$\Delta t_{mI(II)} = \frac{\Delta t_{hI(II)} - \Delta t_{II(II)}}{\ln \left(\Delta t_{hI(II)} / \Delta t_{II(II)} \right)} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.78)$$

где Δt_{hI} , Δt_{hII} , Δt_{II} , Δt_{III} – большие и меньшие разности температур, °C, определяемые из соотношений: $\Delta t_{hI} = t - t''$; $\Delta t_{II} = \Delta t_{hII} = t_b - t_{be}$; $\Delta t_{III} = t - t'$.

Предварительные значения начальных t_b^{wl} и конечных t_e^{wl} температур поверхности теплообмена со стороны конденсирующихся загрязнителей принимают по выражению:

$$\Delta t_{b(e)}^{wl} = t_{b(e)} - (\Delta t_{mII} / 2), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.79)$$

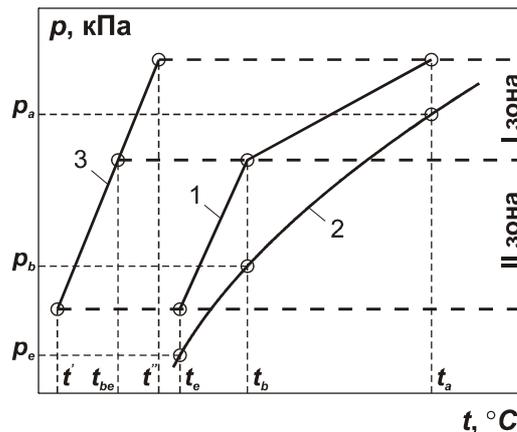


Рис. 2.7 Изменение температуры и давлений насыщенных паров конденсируемых компонентов выбросов в характерных зонах конденсатора : I – охлаждение без конденсации; II – конденсация в аппарате

1 – температура выбросов, 2 – давление насыщенных паров конденсируемого компонента, 3 – температура хладоносителя

6. Приняв по опытным данным ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи на первой (K_I) и второй (K_{II}) стадиях обработки, определяют предварительно величины площадей теплообмена:

$$f_{I(II)} = Q_{I(II)} / K_{I(II)} \Delta t_{mI(II)}, \text{ м}^2; \quad (2.80)$$

При отсутствии подходящих опытных данных предварительно принимаются ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи $K_I = 20 \dots 50$ Вт/(м²К) и $K_{II} = 100 \dots 150$ Вт/(м²К).

Дальнейшая схема решения задачи зависит от соотношения площадей теплообмена f_I и f_{II} . Если содержание паров загрязнителей в газовых выбросах высоко и $f_I/f_{II} < 0,1$, то подбор типоразмера конденсатора производится по суммарной площади теплообмена $f_I + f_{II}$. После этого

можно выполнить уточненный расчет по типовой методике расчета конденсаторов чистого пара с эмпирической поправкой к коэффициенту теплопередачи, учитывающей присутствие неконденсирующихся газов ([132]).

При невысоком содержании паров загрязнителей в газовых выбросах и $f_{II}/f_I < 0,1$ типоразмер конденсатора также подбирают по суммарной площади теплообмена, а уточненный расчет может выполняться по типовой методике для газо- или воздухонагревателей (охладителей) поверхностного типа, без учета процесса конденсации.

Если площади f_I и f_{II} сопоставимы, приходится принимать модель двухступенчатой обработки с автономным расчетом каждой ступени теплообменника. В таком случае для ступени охлаждения газов до температуры начала конденсации можно использовать типовую методику расчета поверхностных воздухоохладителей. При этом упрощенно предполагается, что процесс конденсации паров загрязнителей из выбросов происходит только на второй ступени, которую рассчитывают как самостоятельный конденсатор. Приводимая далее схема расчета относится к стадии конденсационной обработки.

7. Необходимо определить среднюю величину теплового потока q , Вт/м², от отбросных газов к поверхности конденсации:

$$q = \alpha_1 \Delta t_1 + \sum_{i=1}^N I_i^{ev} \beta_i (\rho_b - \rho_e) \text{Вт/м}^2, \quad (2.81)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); $t_1 = (t_b - t_e)/2$ – средняя разность температур, °С; β_i – коэффициенты массоотдачи конденсирующихся ингредиентов, м/с; ρ_b, ρ_e – начальные и конечные концентрации (плотности) конденсирующихся загрязнителей, кг/м³.

Для стационарного процесса теплопередачи справедливо равенство

$$q = \alpha_2 \Delta t_2 \text{Вт/м}^2, \quad (2.82)$$

где α_2 – коэффициент теплопередачи через пленку конденсата, Вт/(м²К); t_2 – средняя разность температуры на границах пленки конденсата, подсчитываемая по соотношению:

$$\Delta t_2 = \frac{(t_b + t_e)}{2} - \frac{(\Delta t_b^{wl} + \Delta t_e^{wl})}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.83)$$

Проверенных опытом зависимостей для коэффициентов тепло- и массоотдачи при конденсации паров различных индивидуальных веществ и смесей из потока неконденсирующихся газов нет. Приводимое обычно в учебниках выражение получено Л.Д. Берманом и С.Н. Фуксом (1958) в опытах с конденсацией водяного пара из воздуха на горизонтальных трубах:

$$\text{Nu}_D = 0,5 \text{Re}^{0,5} \varepsilon^{-0,6} p_r^{-0,33}, \quad (2.84)$$

где ε – исходное содержание выбросов в парогазовой смеси (в объемных долях); p_r – относительное давление (отношение перепада давления паров в процессе конденсации к абсолютному давлению в системе).

В случае конденсации пара другого вещества по нему можно получать только ориентировочные значения коэффициента массоотдачи

$$\beta_i = \text{Nu}_D \cdot D_i / l \quad (2.85)$$

где D_i – коэффициенты диффузии компонентов паров загрязнителей, м²/с.

Физические параметры, необходимые в (2.85), также принимаются ориентировочно, по средней температуре парогазового потока около поверхности конденсации (практически по средней температуре поверхности конденсации без учета скачка температур-см., напр., [162]). Если опытные данные о параметрах конкретных ингредиентов отсутствуют, то их расчеты по различным корреляционным зависимостям, например, значения D_i по известным формулам для двухкомпонентных сред, могут дать для многокомпонентных систем сведения только ориентировочного характера. Это же значение Nu_D используется и для нахождения коэффициента теплоотдачи α_1 .

Коэффициент теплопередачи α_2 через пленку конденсата к наружной поверхности трубы можно определять по уравнению Нуссельта. В [163] уравнение Нуссельта приведено к форме, учитывающей количество труб в пучках n и интенсификацию теплообмена при волнообразовании в ламинарно текущей пленке конденсата. Для случая конденсации смеси паров загрязнителей его можно представить в виде:

$$\alpha_2 = C \lambda_{mx} \sqrt[3]{\rho_{mx}^2 n l / \left(\eta_{mx} \sum_{i=1}^N \vartheta_i W_{gi} \right)} \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К}), \quad (2.86)$$

где C – коэффициент, l – определяющий размер, м, n – число труб конденсатора.

Вследствие отсутствия эмпирической информации для большинства сочетаний N сконденсировавшихся загрязнителей физические параметры образовавшейся жидкой смеси ρ_{mx} , кг/м^3 , λ_{mx} , $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$, η_{mx} , $\text{Па}\cdot\text{с}$ определяются по средней температуре пленки конденсата

$$t_m = (t_b + t_e + t_b^{wl} + t_e^{wl}) / 4 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.87)$$

или с дополнительным учетом каких либо особенностей конкретных процессов теплообмена, например, переменности физических свойств конденсата вследствие неізотермичности [132] путем умножения α_2 на температурную поправку ϵ_t , представляемую как отношение коэффициентов теплопроводности λ_{wl} , λ_{m} , $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$, и динамической вязкости η_{wl} , η_m , $\text{Па}\cdot\text{с}$, конденсата при температуре стенки и при средней температуре пленки конденсата, в виде

$$\epsilon_t = \left[\lambda_{wl} \eta^{0,33} / (\lambda^{0,33} \eta) \right]^{0,375}. \quad (2.88)$$

8. Производится увязка значения теплового потока, вычисленного по формулам (2.82, 2.83). Так как начальная и конечная температуры поверхности конденсации жестко связаны с заданными значениями концентраций загрязнителей на входе и выходе, необходимо варьировать температурой хладоносителя и стенки.

9. Коэффициент теплоотдачи α_3 , $\text{Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$, от внутренней стенки трубы к хладоносителю определяется по обычной методике теплотехнического расчета ограждений сумму термических сопротивлений стенки трубы с отложениями на внешней и внутренней поверхности. Эмпирические зависимости вида $Nu = f(Re, Pr)$ для определения коэффициента теплоотдачи α_3 , подбираемые с учетом режима движения хладоносителя в трубах, включают в себя ряд физических характеристик сред и ограждений, зависящих от их температуры, которая в случае конденсации отдельных компонентов из выбросов не всегда может быть точно определена. Это касается и самих зависимостей, вид которых, особенно для переходных режимов движения потоков, сильно зависит от интерполяционных коэффициентов при показателях степеней переменных, определяемых приближенно.

10. Коэффициент теплопередачи от конденсата к хладоносителю k вычисляют через значение α_2 , полученное в п. 8, и α_3 , рассчитанное в п. 9.

Далее, после уточнения температурного напора Δt_{mII} на второй стадии обработки газовых выбросов с учетом увязки тепловых потоков (п.8) и подсчета величины теплового потока от пленки конденсата к хладоносителю

$$q = k\Delta t_{mII}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.89)$$

может вновь оказаться необходимой увязка значения теплового потока, вычисленного по формулам (2.82, 2.83, 2.89).

11. После увязки определяют суммарный коэффициент теплопередачи для второй стадии обработки:

$$K_{II} = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{k} \right), \text{ Вт/(м}^2\text{К)}. \quad (2.90)$$

Данная методика обеспечивает точность определения площади и выбора типоразмера конденсатора, достаточную для практического применения. Схема была опробована в процессе конденсации паров растворителей ОАО «Тасма» (г. Казань), нашла распространение в РФ благодаря публикации в [58] и на сегодняшний день рекламаций не имеет.

2.5 Совершенствование теоретической базы расчетов сорбционной обработки выбросов помещений КРУЭ с галогенсодержащими загрязнителями

2.5.1 Анализ термодинамических закономерностей процесса сорбции

На границах раздела фаз, в зонах контакта твердой, жидкой и газообразной сред, благодаря особым условиям зарождаются и формируются многие природные явления, связанные с процессами обмена импульсом, теплом, веществом, с фазовыми переходами, химическими реакциями.

Движущаяся относительно поверхности среда теряет скорость у границы раздела фаз и оставляет на поверхности слой неподвижных молекул, которые очень прочно связываются с ней. Характер торможения о него последующих слоев определяет закономерности движения, тепло- и массообмена потоков газов и жидкостей с окружающими объектами. Своеобразие движения частиц в аэродисперсных потоках также обусловлено процессами, происходящими в результате взаимодействия поверхностей взвешенных частиц с обтекающей их средой.

Развитие химических процессов в гетерогенных системах лимитируется характеристиками поверхностей, разделяющих фазы. Режим горения твердого топлива определяется в основном интенсивностью обеспечения молекулами кислорода его поверхности. Молекулы веществ, попадающих в земную атмосферу, осев на поверхностях взвешенных в ней

частиц, обретают новые свойства, например, реакционную способность к окружающим их молекулам кислорода, азота, других газов. Особые условия на границах раздела фаз имеют место вследствие различия свойств структурных элементов (ионов, молекул, атомов), образующих поверхность и объем конденсированной фазы.

Одно из различий – избыточная энергия элементов, составляющих поверхность. Она позволяет им притягивать и удерживать около себя, у поверхности, т.е. адсорбировать молекулы внешней среды. Явление адсорбции часто используется в технологии извлечения ценных компонентов газовых и жидких смесей, а в сфере санитарной очистки отработанного выбросов и др. газов это основной, и зачастую единственно возможный способ обезвреживания.

Пока процесс адсорбции изучен еще неполно. Теоретические модели созданы, как правило, для исследования отдельных сторон и специфичных проблем. Это сложный многоэтапный процесс (рис. 2.8), и его параметры зависят от множества взаимосвязанных факторов.

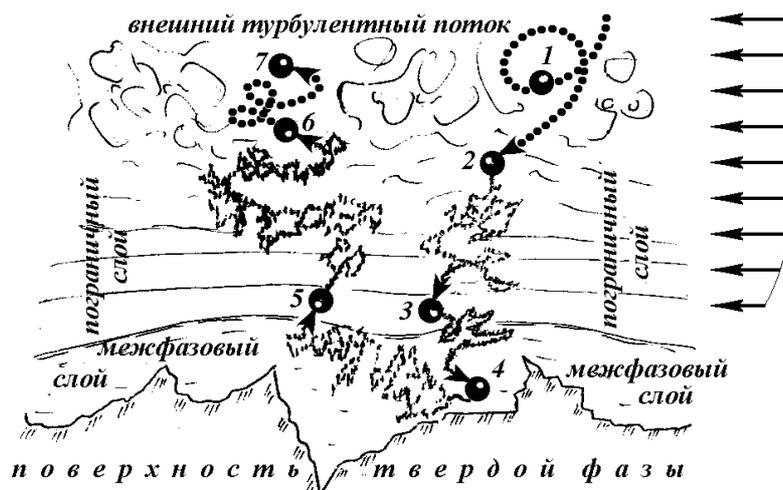


Рис. 2.8 Взаимодействие молекул потока с ограничивающей поверхностью

Из внешнего потока молекула переносится в пограничный гидродинамический слой турбулентной диффузией (1-2). Ее дальнейшее передвижение обусловлено молекулярной диффузией (2-3). Продолжая хаотично диффундировать, молекула может проникнуть в трещины, поры и достичь межфазового слоя (3-4). В зоне действия поверхностных сил (4) она может удерживаться поверхностью, т.е. сорбироваться. Десорбировавшийся объект, преодолев за счет молекулярной диффузии межфазовый (4-5) и пограничный (5-6) слои, затем может быть перенесен турбулентными вихрями (6-7) в основной поток.

При изучении процесса адсорбции различают две его крайние разновидности – физическую и химическую (хемосорбцию). В физическом процессе адсорбирующиеся молекулы и структурные элементы поверхности (ионы, атомы и молекулы) взаимодействуют

без нарушения межатомных связей, а хемосорбция становится возможной в условиях, когда энергия частиц поверхности и молекул газа начинает превышать энергию активации соответствующей химической реакции.

Таким образом, сорбция частицы движущейся среды на поверхности – сложное явление, которое регулируется параметрами потока, свойствами (физико-химическими характеристиками, электронной структурой, морфологией) поверхности, большим числом других факторов. Поэтому сведения начальные об адсорбции были систематизированы на базе термодинамических методов, которые являются независимыми от макро- и микроскопических особенностей изучаемых систем, и в силу этого универсальными. В 1814 г. Т. дё Соссюр, изучавший адсорбцию газов на угле, отметил, что способность газов адсорбироваться растёт со снижением давления насыщенных паров веществ: легче адсорбируются газы с более высокой температурой конденсации [164]. В начале XX века С. Аррениус, обнаружив соответствие количества адсорбированного газа с константой a уравнения Ван-дер-Ваальса, сделал вывод, что между молекулами газа и поверхности действуют силы, аналогичные силам притяжения между молекулами в объёме газа (вандерваальсовым силам). Модель адсорбции, основанная на предположении, что процесс осуществляется только посредством вандерваальсовых сил, представляет один из предельных вариантов – чисто физическую адсорбцию [165].

Примерно в то же время было установлено, что молекулы многих газов, адсорбированных на поверхностях различных веществ, обратимо десорбируются только при очень низких температурах (ниже -100°C). В системах с более высокими температурами некоторая доля молекул адсорбированных газов вступает в реакции с элементами поверхности. В результате образуются конгломераты, аналогичные химическим соединениям.

Термодинамические расчеты параметров адсорбции. Составы газовой фазы и межфазового слоя

Процессы адсорбции формируются, развиваются и завершаются в межфазовом слое, который по свойствам существенно отличается и от газа и от твердой фазы. Основа изучения свойств межфазового слоя и происходящих в нем процессов была положена Гиббсом [166] и Поляни. Обзор по проблемам теории адсорбции Поляни представлен в [167] и множестве других работ.

Гиббс составил термодинамическую систему из твердого тела и окружающей его K -компонентной газовой среды. Соответственно, вся система состояла из $K + 1$ компонентов и двух фаз.



Рис. 2.9 Компоненты межфазового слоя

Толщина δ (Рис. 2.9) межфазового слоя, или по Гиббсу, «поверхности разрыва» такая, чтобы все $K+1$ компонентов находились в его объеме. При этом в межфазовом слое они распределены иначе, чем в объемах газовой и твердой фаз. Таким образом, в межфазовом слое окажутся приповерхностная зона твердой фазы толщиной δ_1 и зона адсорбированного газа толщиной δ_2 . Приповерхностная зона твердого тела будет содержать те его частицы (структурные элементы), на которые воздействуют адсорбированные молекулы газа, включая и слой поверхностных частиц, непосредственно контактирующих с адсорбатом.

Принято также, что твердая часть межфазового слоя имеет такой же состав, как и объем твердой фазы, но иную структуру, а слой адсорбированного газа (адсорбат) содержит те же компоненты, что и газовая фаза, но в других пропорциях, и находится в динамическом равновесии с газовой фазой.

В соответствии с I законом термодинамики изменение внутренней энергии закрытой равновесной K – компонентной многофазной системы, в которой совершается механическая работа и возможны химические и фазовые превращения, в общем виде определяется выражением

$$du = Tds - \sum_{i=1}^M L_i dl_i - \sum_{j=1}^N X_j dx_j, \quad (2.91)$$

где $\sum_{i=1}^M L_i dl_i$, $\sum_{j=1}^N X_j dx_j$ – соответственно суммы работ механического и

немеханического характера, которые могут быть произведены в рассматриваемой системе;

L_i , dl_i – обобщенные движущие силы и обобщенные координаты процессов производства работ механического характера;

X_j , dx_j – то же, работ немеханического характера;

M, N – количество видов производимых работ, соответственно механического и немеханического характера.

После ввода в него движущих сил и координат конкретных видов работ механического характера в газовой фазе определив их работой расширения или сжатия (изменения объема)

$\sum_{i=1}^M L_i dl_i = pdv$, и работ немеханического характера, представив их как суммы произведений

химических потенциалов ψ_i и масс m_i по всем K компонентам газовой фазы, т.е.

$\sum_{j=1}^N X_j dx_j = \sum_{i=1}^K \psi_i dm_i$, уравнение (2.91) примет вид:

$$du = Tds - pdv - \sum_{i=1}^K \psi_i dm_i . \quad (2.92)$$

Используя определение потенциала Гиббса

$$G = u + pv - Ts , \quad (2.93)$$

после преобразований и индексации величин, относящихся к газовой фазе, верхними индексами (1):

$$dG = -s^{(1)} dT + v^{(1)} dp - \sum_{i=1}^K \psi_i^{(1)} dm_i^{(1)} , \quad (2.94)$$

где $v^{(1)}, s^{(1)}$ - молярные объем и энтропия газовой фазы;

$\psi_i^{(1)}, m_i^{(1)}$ – химический потенциал и масса i – го компонента газовой фазы. При условии равновесия в газовой фазе $G = \text{const}$, $dG = 0$ и

$$v^{(1)} dp = s^{(1)} dT + \sum_{i=1}^K \psi_i^{(1)} dm_i^{(1)} . \quad (2.95)$$

Прежде чем использовать I закон термодинамики для описания состояния адсорбата, вводятся некоторые уточнения. Общие термодинамические законы можно применять только к системам, параметры состояния которых во всех точках одинаковы, а энергия и другие экстенсивные (зависящие от количества вещества) характеристики аддитивны. Область у поверхности твердого тела, где располагается адсорбированный слой газа, неоднородна, давление в ней отличается от давления в объеме газа, а энергия теряет свойство аддитивности вследствие взаимодействия адсорбата и с твердой поверхностью, и с газом. Поэтому полную энергию межфазового слоя нельзя подсчитать, сложив доли энергии адсорбата и приповерхностной зоны твердой фазы, принятые пропорциональными долям газовой и твердой фаз в количестве вещества межфазового слоя.

Чтобы корректно использовать уравнение изобарно-изотермического потенциала, Гиббсом было введено следующее требование. Границы раздела адсорбата и газового объема, а также приповерхностной и объемной областей твердой фазы, должны выбираться на достаточно далеком расстоянии от линии раздела фаз (поверхности твердого тела) – таком, чтобы силы, действующие между газом и адсорбатом, а также между приповерхностной областью и объемом твердой фазы, были ничтожно малы. Это позволяет предполагать, что силы, вызванные неоднородностью температур, давлений, химических потенциалов в межфазовом слое, не будут проникать через граничные плоскости. Вводимое требование можно рассматривать как условие обратимого динамического равновесия межфазовой области с приложенными извне силами. Со времени опубликования Гиббсом этого требования выполнено множество работ, посвященных выяснению справедливости применения I закона термодинамики к гиббсовской «поверхности раздела», а также попыткам устранить неопределенность положения границы раздела фаз и ее количественного определения. Вместе с тем выраженное в них мнение о том, что корректность уравнений, связанных с вводимым ниже поверхностным натяжением, зависит от выбора положения разделяющей поверхности, автор работы [168] считает ошибочным. Он показывает, что нет необходимости связывать анализ термодинамических уравнений разделяющей поверхности с каким-либо ее частным положением. Это показывают и работы конца 40-х – начала 50-х г.г. прошлого века, в которых рассматривается физический смысл понятия поверхности разрыва в рамках ее молекулярного строения, а не макроскопического описания. С этой точки зрения математически точного местоположения поверхности разрыва принципиально не существует, поскольку граница раздела фаз даже термодинамически равновесной системы всегда находится в динамическом равновесии: определенное количество молекул испаряется с поверхности и конденсируется на ней.

При составлении уравнения изменения внутренней энергии для межфазовой области в сумме работ механического характера учитывают еще работу по формированию поверхности адсорбата на границе раздела фаз. Ее представляют через произведение изменения площади поверхности раздела фаз f (в качестве координаты) на условную величину поверхностного натяжения σ слоя молекул адсорбата на линии раздела (в качестве движущей силы), и тогда в целом

$$du = Tds^{(2)} - pdv^{(2)} - \sigma df - \sum_{i=1}^K \psi_i^{(2)} dm_i^{(2)}, \quad (2.96)$$

где верхние индексы (2) показывают принадлежность величин к адсорбату.

После преобразований, аналогичных предыдущим, изменение потенциала Гиббса

$$dG = -s^{(2)}dT + v^{(2)}dp - \sigma df - \sum_{i=1}^K \psi_i^{(2)} dm_i^{(2)} \quad (2.97)$$

При $dG = 0$

$$v^{(2)}dp = s^{(2)}dT + \sigma df + \sum_{i=1}^K \psi_i^{(2)} dm_i^{(2)} \quad (2.98)$$

Такие уравнения составляют для каждого из K компонентов, находящихся в условиях обратимого равновесия газовой фазы с адсорбатом. Для двухкомпонентной газовой смеси ($K = 2$):

$$\left. \frac{dx_1^{(2)}}{dx_1^{(1)}} \right|_{p,T} = \frac{G_{11}^{(1)}}{G_{11}^{(2)}} \left[1 - \frac{1}{\phi^{(2)}} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_1} \right)^{(2)} (x_1^{(2)} - x_1^{(1)}) \right]; \quad (2.99)$$

$$\left. \frac{dx_2^{(2)}}{dx_2^{(1)}} \right|_{p,T} = \frac{G_{22}^{(1)}}{G_{22}^{(2)}} \left[1 - \frac{1}{\phi^{(2)}} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_2} \right)^{(2)} (x_2^{(2)} - x_2^{(1)}) \right]. \quad (2.100)$$

В уравнениях (2.99, 2.100) в отличие от (2.97, 2.98) вместо массовых распределений m_i использованы мольные x_i , площадь поверхности раздела фаз f отнесена к молю вещества и обозначена ϕ ; символом G_{ii} обозначена вторая производная потенциала Гиббса по i -му компоненту: $G_{ii} = (\partial^2 G / \partial x_i^2)_{p,T}$. Величина поверхностного натяжения адсорбционной пленки σ для упрощения опущена.

Такие уравнения характеризуют равновесные концентрации адсорбирующегося вещества в газовой фазе и у поверхности твердой фазы. Вместе с тем в них не отражаются свойства поверхности и ее участие в процессе сорбции.

Изотермы сорбции. Анализ модели Лэнгмюра

Поверхность адсорбента не может удерживать у себя сколько угодно много молекул газовой среды. По накоплении определенного количества молекул наблюдается некоторое подобие насыщения поверхности и остановки процесса адсорбции в равновесном состоянии системы адсорбент-адсорбат. Равновесное количество адсорбата, которое насыщает единицу массы адсорбента до равновесного состояния, или адсорбционная емкость адсорбента, зависит от температуры и давления газового объема, а также от природы (вида) сорбента и газа, т.е. от их физико-химических характеристик.

Первое соотношение для равновесного объема адсорбированного газа было получено в начале XX века опытным путем. Это уравнение Фрэйндлиха ([164]), которое до сих пор используют в технических расчетах ввиду его простоты:

$$v = kp^{1/n}, \quad (2.101)$$

где p , v – давление и адсорбированный объем газа; k , n – эмпирические константы.

Уравнение Фрэйндлиха с набором опытных значений k , n , справедливых для конкретных адсорбентов, адсорбатов, условий сорбции, весьма полезно в расчетах соответствующих процессов и аппаратов. Вместе с тем, очевидно, прогнозировать на основе уравнения Фрэйндлиха процессы, выходящие за опытные параметры, невозможно, так как информацию о сущности явления адсорбции в явном виде оно не дает.

Первое теоретическое уравнение, связывающее объем адсорбированного газа с его равновесным давлением при постоянной температуре, было получено в 1917 г. Лэнгмюром. Он рассматривал состояние адсорбционного равновесия как процесс, в котором скорости адсорбции и десорбции одинаковы, и количество адсорбированных на поверхности молекул не изменяется. Предполагалось, что часть молекул, сталкивающихся с поверхностью, остается на ней в адсорбированном состоянии до тех пор, пока не приобретет достаточной энергии для испарения (десорбции).

Согласно молекулярно-кинетической теории, число ударов молекул по единичной площади поверхности за единицу времени

$$N_{ad} = \frac{p}{(2\pi mkT)^{1/2}} m^{-2} c^{-1}, \quad (2.102)$$

где p , T – давление, Pa , и абсолютная температура, K , среды;

m – масса молекулы, kg ;

k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$;

Лэнгмюр считал, что радиус действия поверхностных сил не превышает размера молекул, а потому смогут адсорбироваться только молекулы, сталкивающиеся с чистой поверхностью, и на ней будет удержан только один слой молекул. В соответствии с этой моделью скорость адсорбции, приведенная к единице площади поверхности,

$$w_{ad} = k_{ad} N_{ad} (1 - f_0) \quad (2.103)$$

где f_0 – поверхность, покрытая адсорбированными молекулами, выраженная в долях от максимальной поверхности адсорбции, т.е. от площади, покрываемой адсорбентом в состоянии равновесия; k_{ad} – отношение числа столкновений молекул с чистой поверхностью к общему числу столкновений, или коэффициент адсорбции.

По нашему мнению, в такой модели должен еще иметь место фактор, учитывающий направление изменения энтропии в ходе процесса. Вероятность попадания хаотично движущихся молекул газа на свободную площадь поверхности снижается с ее заполнением, и поэтому процесс адсорбции на площадке с конечными размерами направлен в сторону уменьшения энтропии. Энтропия заполненной молекулами площадки ниже, чем пустой. Следовательно, с начала процесса осаждения молекул из газовой фазы на поверхность вплоть до достижения состояния равновесия энтропия уменьшается. Одновременно растет энтропия газового объема: количество молекул в нем уменьшается, и следовательно, он удаляется от состояния конденсации, т.е. от перехода в более упорядоченную жидкую фазу.

Количество молекул N_{ds} , десорбирующихся с единицы площади за единицу времени, зависит от уровня энергии системы. Лэнгмюр предположил, что N_{ds} экспоненциально зависит от энергии связи молекулы с поверхностью, которая примерно равна количеству теплоты q , выделившейся при адсорбции:

$$N_{ds} = k_{ds} \exp\left(-\frac{q}{RT}\right) \quad (2.104)$$

где k_{ds} – коэффициент, зависящий от температуры.

В конечном итоге коэффициент k_{ds} , как и k_{ad} , компенсирует недостаточность наших знаний о процессе десорбции и неточности предложенной модели. Экспоненциальной кривой невозможно отобразить последовательность и скорости разрыва отдельных связей адсорбированных частиц и поверхности при увеличении расстояния между ними, а также остальные взаимодействия в цепочках элементарных стадий, формирующих ход реального процесса десорбции.

Скорость десорбции молекул с единичной площадки будет равна

$$w_{ds} = N_{ds} f_0. \quad (2.105)$$

В состоянии равновесия скорости адсорбции и десорбции становятся одинаковыми:

$$k_{ad} N_{ad} (1 - f_0) = N_{ds} f_0, \quad (2.106)$$

Обозначив

$$\frac{k_{ad} \exp\left(\frac{q}{RT}\right)}{k_{ds} (2\pi mkT)^{1/2}} = b, \quad (2.107)$$

можно получить уравнение Лэнгмюра

$$f_0 = \frac{bp}{1 + bp}, \quad (2.108)$$

где b при постоянной температуре должна быть константой. Представив долю поверхности f_0 , покрытой адсорбированными молекулами, как

$$f_0 = v/v_{eq}, \quad (2.109)$$

где v – объем адсорбированного газа; v_{eq} – объем газа, покрывающего поверхность монослоем в равновесном состоянии, выражение (2.108) преобразуют еще следующим образом:

$$v = \frac{v_{eq} bp}{1 + bp}. \quad (2.110)$$

Уравнение Лэнгмюра было получено также методами статистической механики и термодинамики. Подробный анализ уравнения Лэнгмюра проведен в [167].

Формы изотерм сорбции, подобных рассмотренной, характерны для мономолекулярной физической адсорбции и хемосорбции. Для примера на Рис. 2.10 приведены изотермы мономолекулярной физической адсорбции хлористого этила (этилхлорида) C_2H_5Cl на угле при $-15^\circ C$, $0^\circ C$, $20^\circ C$, а в справочной таблице на поле графика – его температуры кипения при различных давлениях.

Изотермы физической сорбции большинства веществ не описываются уравнением Лэнгмюра. Аналогичными по форме оказываются изотермы хемосорбции, например, сорбции кислорода на угле в пределах температур, соответствующих стационарной химической реакции.

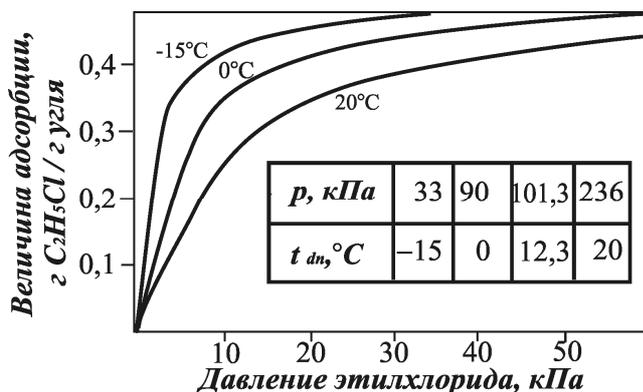


Рис. 2.10 Мономолекулярная адсорбция этилхлорида на угле;

t_{dn} – температура кипения

Изотермы сорбции паров многих веществ с той или иной степенью приближения могут быть сведены к 5 наиболее распространенным типам, найденных Брунауэром, Эмметом и Теллером, систематизировавшим в 30-х годах прошлого века опытные данные по адсорбции. Наряду с этим есть вещества, сорбции паров которых не соответствует ни один из приведенных в [167] типов изотерм.

Анализ модели сорбции по БЭТ

Теория адсорбции по Брунауэру, Эммету и Теллеру – теория БЭТ, базируется на эмпирических сведениях, показывающих возможность удержания поверхностью адсорбента не одного, а нескольких слоев молекул адсорбирующегося газа. Другие положения теории БЭТ аналогичны теории Лэнгмюра, а его уравнение сорбции считается справедливым для процесса осаждения молекул в каждом отдельном слое.

Условие равенства скорости испарения из первого слоя с конденсацией на поверхности

$$a_1 p f_0 = b_1 f_1 \exp\left(-\frac{q_1}{RT}\right) \quad (2.111)$$

аналогично соответствующему уравнению (2.106) теории Лэнгмюра, за исключением того, что при описании скорости испарения из первого слоя используется, естественно, доля поверхности f_1 , представляющая отношение площади первого над поверхностью слоя адсорбированных молекул к площади поверхности адсорбента.

Однако поверхность в теории БЭТ (и в теории Лэнгмюра) рассматривается как однородная подложка для осаждения молекул (Рис. 2.11). Взаимодействия молекул адсорбата с поверхностью не учитываются. Уравнения равновесия не привязываются к характеристикам, которые могут зависеть от свойств самой системы (например, к константе адсорбции на поверхности a_0 в уравнении 2.111).

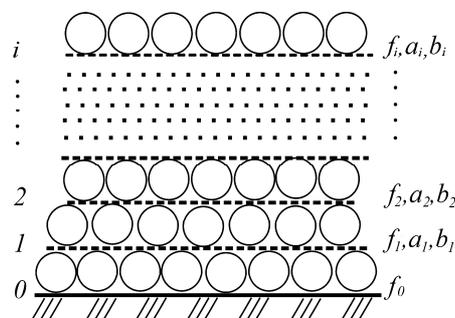


Рис. 2.11. Схема полимолекулярной адсорбции

При описании конденсации в нулевом (поверхностном) слое используется константа адсорбции для первого слоя a_1

В равновесном состоянии не должны изменяться и доли поверхности f_1, f_2, \dots, f_i , представляющие собой отношение площадей первого над поверхностью, второго, ..., i -го слоев адсорбированных молекул к площади поверхности адсорбента. Чтобы была постоянной величина f_1 , сумма скоростей конденсации на первом слое и испарения из него должна быть равна сумме скоростей испарения из второго слоя и конденсации на поверхности:

$$a_2 p f_1 + b_1 f_1 \exp\left(-\frac{q_1}{RT}\right) = a_1 p f_0 + b_2 f_2 \exp\left(-\frac{q_2}{RT}\right). \quad (2.112)$$

Из (2.111) и (2.112):

$$a_2 p f_1 = b_2 f_2 \exp\left(-\frac{q_2}{RT}\right). \quad (2.113)$$

Полученное уравнение автоматически учитывает условие динамического равновесия, т.е. равенства скоростей адсорбции и десорбции, на соседних слоях. Уравнения равновесия последующих слоев составляются аналогично:

$$a_i p f_{(i-1)} = b_i f_i \exp\left(-\frac{q_i}{RT}\right) \quad (2.114)$$

где q_i – теплота адсорбции i -го слоя; a_i, b_i – константы адсорбции (конденсации) и десорбции (испарения) для уравнения i -го слоя.

В уравнениях (2.111, 2.112, 2.113, 2.114) значения q_2, \dots, q_i приравнивают к теплоте конденсации пара адсорбируемого вещества q_L , а величину q_1 считают несколько отличающейся от нее.

Обозначив

$$b_i/a_i = g \quad (2.115)$$

и приняв $g = \text{const}$, можно получить соотношения, подобные уравнению Лэнгмюра, для многослойной адсорбции. Наиболее простое из таких соотношений – двухпараметрическое уравнение БЭТ

$$f = \frac{y}{(1-x)(1-x+y)}, \quad (2.116)$$

в котором

$$y = p \exp[q_1/(RT)]/g; x = p \exp[q_L/(RT)]/g. \quad (2.117)$$

Соотношения, подобные двухпараметрическому уравнению, были получены затем другими авторами посредством методов статистической механики и термодинамики.

Отношение $y / x = c$ уравнения БЭТ могло бы служить константой равновесия полимолекулярной адсорбции, однако ни у одного типа изотерм его постоянство не сохраняется по всему интервалу давлений - от 0 до давления насыщенного пара p_{dn} . Вместе с тем в отдельных случаях можно выявить области давлений, где значения c постоянны. Такая область значений x, f, p является весьма важной – формирующей закономерности процесса адсорбции, и в этом отношении уравнения БЭТ представляют ценность. Еще одним достоинством является возможность вычисления параметров адсорбции при $f = 1$, а также площади поверхности f_0 конкретного адсорбента, которая в условиях равновесия заполняется монослоем молекул конкретного газа. Других способов нахождения удельных поверхностей адсорбции высокодисперсных и пористых твердых материалов, кроме расчетов по уравнению БЭТ, нет.

Однако теория БЭТ имеет известные ограничения в применении. В пределах области БЭТ, т.е. интервала $0,5 \leq f \leq 1,5$, рассчитанные по уравнениям БЭТ данные хорошо совпадают с опытными. Вне области БЭТ теория дает неточные значения величин адсорбции. По-видимому, на результатах расчетов при значениях $x > 0,35$ ($f > 1,5$), т.е. практически для 2-го, 3-го и последующих адсорбированных слоев, начинают сказываться неточности, связанные с допущениями $q = \text{const}$ и $g = \text{const}$.

Попытки описания при помощи уравнений БЭТ опытных данных по адсорбции различных веществ и объяснения наблюдающихся расхождений непостоянством теплоты адсорбции слоев сделаны во множестве работ. Отдельные авторы отмечают, что проблема может заключаться в изменении энтропии, высказывая, например, мнение, что с ростом x энтропийный множитель должен уменьшаться. Действительно, неточности предположения становятся очевидными при анализе характера изменения энтропии в системе адсорбент – газовая среда.

В моделях сорбции Лэнгмюра и БЭТ поверхность адсорбента играет пассивную роль мишени для хаотично перемещающихся возле нее молекул газа. Предполагается, что молекулы оседают на поверхности вследствие случайного попадания в такую зону, где они могут адсорбироваться, т.е. задержаться, и, выделив часть своей энергии, перейти из газообразного состояния в конденсированное. С осаждением молекул из газового объема и приближением системы к равновесию площадь свободной поверхности адсорбента сокращается, и вероятность

попадания на нее беспорядочно движущихся объектов, в том числе молекул газа, снижается. Соответственно уменьшается энтропия приповерхностной области системы.

Известно, что процессы идут самопроизвольно в наиболее вероятном направлении – в сторону роста энтропии. При адсорбции же накопление молекул определенного газа у поверхности не прекращается вплоть до достижения равновесного состояния, хотя энтропия адсорбированного газа, т.е. части системы с изначально меньшей энтропией, в ходе адсорбции уменьшается. Одновременно растет энтропия неадсорбированной части газа - части системы с изначально более высокой энтропией. С уменьшением числа молекул в объеме газа снижается давление, и газ отдаляется от более упорядоченного, имеющего меньшую энтропию, конденсированного состояния. Таким образом, с уменьшением молекул энтропия газовой среды возрастает.

Итак, энтропии адсорбированной и неадсорбированной частей газовой среды в ходе адсорбции не стремятся к выравниванию, а все больше разнятся, причем по завершении процесса, в равновесном состоянии, разность энтропий достигает максимума. Поэтому, очевидно, адсорбирующуюся газовую среду нельзя рассматривать как самостоятельную область системы, изолированную от поверхностных сил и энергии поверхности, а оседание молекул газа – как самопроизвольный процесс, реализующийся по модели случайных попаданий беспорядочно перемещающихся объектов в пассивную поверхность – мишень.

Роль поверхности в процессе адсорбции активна и весьма значима. Поверхность вкладывает энергию в систему адсорбент – газовая среда и определенным образом регулирует осаждение молекул из объема. В частности, поэтому они продолжают осаждаться вплоть до достижения равновесия, все более снижая давление газа в объеме и увеличивая его давление у поверхности (т.е. все более концентрируя адсорбат), несмотря на растущее при этом расхождение энтропий в разных частях газовой системы. Чтобы реализовать процесс, направленный в сторону уменьшения энтропии, необходимо подводить к системе дополнительную энергию извне. К примеру, процессы охлаждения в холодильных устройствах, т.е. понижение температуры охлаждаемых объектов путем непрерывной передачи их тепла более нагретому объекту - окружающему воздуху, нельзя осуществить без подвода внешней энергии.

Один из авторов теории БЭТ – С. Брунауер, в работе [169] констатирует, что двухпараметрическое уравнение при $x = 0,35$ дает слишком большую величину адсорбции, хотя для некоторых веществ оно хорошо описывает опытные результаты и до $x = 0,4$, но в некоторых случаях адекватность описания нарушается уже при $x = 0,2$. При этом указанный факт не комментируется.

Для определения причины этого ограничения теории БЭТ найдем значения $c = y/x$ для слоев, расположенных близко к поверхности:

$$c = \frac{y}{x} = \frac{\exp\left(-\frac{q_L}{RT}\right)}{\exp\left(-\frac{q_1}{RT}\right)} = \exp\left(\frac{q_1 - q_L}{RT}\right). \quad (2.118)$$

Величина q_L в этом соотношении означает теплоту адсорбции в i – м слое, которая приближенно приравнивается к теплоте конденсации. Равенство $q_i = q_L$ может быть точным для слоев, достаточно удаленных от поверхности, но не для второго или третьего. Можно полагать, что во втором слое теплота адсорбции q_2 может быть близка к q_1 , а не к q_L , и $q_2 \approx q_1$; тогда

$$c = \exp\left(\frac{q_1 - q_2}{RT}\right) = \frac{y}{x} \approx 1, \text{ и} \quad (2.119)$$

$$y = x. \quad (2.120)$$

Подставим это в (2.116):

$$f \approx \frac{y}{(1-x)} = \frac{y}{(1-y)} = \frac{p/\left[g \exp\left(-\frac{q_1}{RT}\right)\right]}{1 - \frac{p}{g \exp\left(-\frac{q_1}{RT}\right)}}. \quad (2.121)$$

Обозначим

$$1/\left[g \exp\left(-\frac{q_1}{RT}\right)\right] = B. \quad (2.122)$$

Тогда

$$f = \frac{Bp}{1 - Bp}. \quad (2.123)$$

Проанализируем (2.123) аналогично (2.108). При малой величине адсорбции Bp много меньше единицы. В этой области давлений на слоях, близких к поверхности,

$$f \approx Bp, \quad (2.124)$$

а количество адсорбирующегося газа приблизительно пропорционально давлению и подчиняется закону Генри.

Из (2.123) также следует, что при увеличении p величина $f \rightarrow \infty$, когда $Bp \rightarrow 1$. Следовательно, это исключает достижение равновесия и противоречит физике процесса

адсорбции. Предельное значение давлений, не противоречащее опыту, можно найти из (2.121).

При $x = 0,33$

$$f = \frac{Bp}{1 - 0,33} \approx 1,5Bp. \quad (2.125)$$

При более высоких значениях x значения f уже становятся неоправданно большими. Чем дальше слой от поверхности, тем меньше влияния оказывают на него поверхностные силы, и параметры адсорбции в этих слоях приближаются к аналогичным параметрам конденсации. Так например, теплоты адсорбции и десорбции становятся близки к значениям теплот конденсации и испарения, и т.д. По этой же причине множитель g , коррелирующий с энтропией, по мере отдаления от поверхности не будет оставаться постоянным [170]. Таким образом, проведенный выше анализ позволяет дать объяснение причине ограничения применения теории БЭТ по давлению или концентрации адсорбируемого вещества.

В целом термодинамические методы позволяют рассчитывать ряд важных параметров адсорбции в состоянии равновесия: химические потенциалы, концентрации компонентов, количество адсорбированного вещества в межфазовой области. Можно также определить, далека ли система от состояния равновесия, подсчитать удельную поверхность адсорбента. Вместе с тем термодинамику невозможно использовать в расчетах неравновесных систем, причем проблема принципиальна: реальные процессы осуществляются за определенный, не бесконечный, промежуток времени и, следовательно, неравновесны. Кроме того, в термодинамических расчетах не учитываются свойства адсорбирующей поверхности. Чтобы определить роль поверхности адсорбента в процессе адсорбции и оценить ее вклад, необходимо рассмотреть электронную структуру поверхности и определить параметры избыточной энергии, за счет которой регулируется осаждение молекул из объема.

Модели моно- и полимолекулярной адсорбции с точки зрения электронной структуры поверхности

Силы, притягивающие молекулы из окружающего объема и задерживающие их у поверхности, возникают при взаимодействии электромагнитных полей, создаваемых электронами и ядрами адсорбирующихся частиц газа и структурных элементов поверхности, находящихся в пределах межфазового слоя.

Электронную структуру межфазового слоя в модели мономолекулярной адсорбции можно представлять себе, по образному выражению Лэнгмюра, «как шахматную доску, состоящую из определенного числа определенным образом расположенных элементарных

участков (поверхности), каждый из которых в состоянии удержать одну адсорбирующуюся частицу» ([164]). Локализация одной частицы газа у одной частицы поверхности характерна для химической связи и модели хемосорбции. Модель полимолекулярной физической адсорбции может осуществиться, если силы ненасыщаемы, не локализованы и действуют на расстояниях, превосходящих по порядку размеры адсорбирующихся атомов и молекул. Такая модель адсорбции, называемая, по Лэнгмюру, «атмосферой в миниатюре», представляет тонкий слой сконцентрированного (сжатого или сжиженного) газа над поверхностью.

Между тем исследования показывают, что чаще всего адсорбция реализуется по промежуточному варианту. Центром адсорбции становятся не отдельный «элементарный (бесконечно малый) участок» (т.е. ячейка, занимаемая структурным элементом поверхности), и не поверхность в целом. Это микроскопические, но конечной величины (возможно, разных размеров) площадки, удерживающие каждая свою «атмосферу» как часть общего слоя адсорбата. Близость реального процесса к граничным моделям обуславливается свойствами взаимодействующих адсорбатов и адсорбентов, в конечном счете зависящими от их электронных структур.

2.5.2 Уточнение решения задачи о нулевых колебаниях для использования в расчетах параметров сорбционной обработки галогенсодержащих выбросов помещений КРУЭ

Энергию частицы газовой среды у поверхности адсорбента принципиально можно принять как среднюю из энергий различных вариантов расположения молекул газовой среды над поверхностью. Энергию такого состояния системы газ-адсорбент, когда частица газа находится достаточно далеко от поверхности, можно принять за исходную. Разность между ними могла бы характеризовать энергию взаимодействия частицы с поверхностью, а ее производные по направлениям x , y , z дали бы компоненты (проекции) силы взаимодействия. Однако на данный момент изучение явления адсорбции на уровне взаимодействия микрочастиц возможно после радикальных исходных упрощений. При этом описание может стать неадекватным рассматриваемому явлению. Неточность решения задачи, вызванная связанным с уровнем развития соответствующей области научных знаний расхождением реального, природного процесса с его физико-математическим описанием, называют «неустранимой» погрешностью. Ее нельзя как-то контролировать (скомпенсировать) в ходе решения задачи, поскольку величины и знаки отклонений от истинных параметров неопределимы. Оценить долю такой погрешности в полученном результате невозможно до тех пор, пока не найдется способ более близкого к реальности описания исходного явления.

Первое из упрощений – разграничение процессов физической и химической адсорбции. Формы адсорбции, которые в теории принято относить к физической или химической, в реальных процессах порознь не встречаются. Физические и химические явления тесно взаимосвязаны и осуществляются совместно, а доля каждого из них в окончательном результате зависит от множества факторов, в том числе от параметров окружающей среды.

Хотя естественный процесс адсорбции унитарен, его деление на физическую и химическую件 полезно для нас постольку, поскольку при одних параметрах системы адсорбат - адсорбент более заметны проявления физических свойств, при других – химических. Абстракции чисто физической и чисто химической адсорбции можно рассматривать как проявления одного процесса, различающиеся степенью обобществления валентных электронов. Результаты расчетов по этим моделям также можно рассматривать как граничные, предельно возможные.

Подходов для определения унитарной силы взаимодействия (ее величины в целом) такой, какова она в действительности при адсорбции, на настоящее время нет. Поэтому, приступая к теоретическим исследованиям физической адсорбции, необходимо еще принять, что сила между взаимодействующими элементами газовой среды и поверхности состоит из некоторых составляющих частей, и ее величину можно вычислить, сложив их определенным образом. Одну из компонент силы взаимодействия называют вандерваальсовыми силами (*VdW*-силами) и относят к силам, обеспечивающим взаимодействия между молекулами. Изучению вандерваальсовых сил посвящено огромное количество работ и сделано большое число обзоров, например, [171].

Считают, что (*VdW*)- силы обособлены от обменных (создающих химические связи посредством обобществления электронов) сил, слабее их, но действуют дальше. При этом они не насыщаются, как обменные, а распространяются одновременно на все элементы в пределах досягаемости. Также полагают, что энергия (*VdW*)- сил соответствует энергии межмолекулярного взаимодействия и составляет около 0,1...0,01 эВ ($1,6 \cdot 10^{-20} \dots 1,6 \cdot 10^{-21}$ Дж) на 1 атом. Для сравнения: энергия ковалентной связи составляет порядка 10...20 эВ, ионной 5...8 эВ, металлической 1...2 эВ, водородной 0,5 эВ на 1 атом.

Основанием для выделения (*VdW*)- сил в качестве самостоятельного компонента адсорбционного взаимодействия послужила их связь с энергией электрических полей, создаваемых атомами как колеблющимися электрическими зарядами. Причиной, вызывающей постоянное появление и исчезновение мгновенных квантовых электрических моментов атомов, существующее в любых известных состояниях материи, считаются фундаментальные

колебания зарядов, которые получили название нулевых и присущи ядрам атомов и электронам по их квантовой природе. Природа самих нулевых колебаний не ясна.

Квантовая поляризация атомов не исчезает при температурах, близких к 0 K . В таких условиях действие каких бы то ни было известных явлений, кроме нулевых колебаний перестает ощущаться, и других факторов для объяснения причин взаимодействия между частицами вещества не остается (либо пока не найдено).

Существование нулевых колебаний доказывают, к примеру, следующие факты. Способность к рассеянию света, проходящего через атомы кристаллов, со снижением температуры уменьшается вследствие ослабления колебания атомов. В области же температур, близких к 0 K , интенсивность рассеяния света, все еще продолжая снижаться, стремится не к нулю, а к определенной конечной величине. Это говорит о том, что при абсолютном нуле способность атомов рассеивать свет не исчезнет; вероятно, не исчезнут и колебания атомов.

Показательно и то, что конденсированные (твердые и жидкие) вещества с понижением температуры, в том числе и в области, близкой к 0 K , не проявляют никаких тенденций к испарению или возгонке, т.е. к распаду на отдельные молекулы. Следовательно, не стремится исчезнуть, уменьшиться до бесконечно малой величины и сила, связывающая молекулы.

Взаимодействие квантующихся осцилляторов.

Задача нахождения характеристик взаимодействия объектов, возникающего в результате их нулевых колебаний, в настоящее время решена для наиболее простых атомов, содержащих по одному протону и электрону.

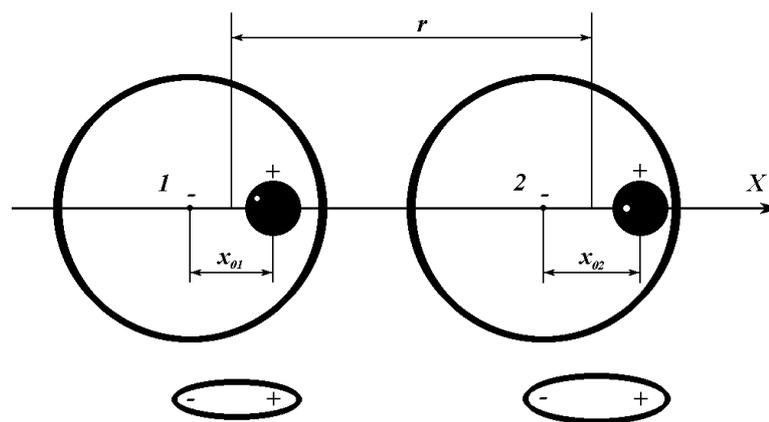


Рис. 2.12. К задаче о взаимодействии двух атомов при одномерных нулевых колебаниях: x_{01} , x_{02} – амплитуды же колебаний левого и правого диполей, r – расстояние между центрами диполей, намного превосходящее плечи x_{01} , x_{02} .

Максимальные дипольные моменты $\mu_{01} = ex_{01}$ и $\mu_{02} = ex_{02}$. Суммарная энергия диполей, совершающих независимые гармонические колебания, при максимумах смещений x_{01} , x_{02} будет равна сумме потенциальных энергий E_{p1} , E_{p2} :

$$E_{p1} + E_{p2} = \frac{m\omega_0^2}{2}x_{01}^2 + \frac{m\omega_0^2}{2}x_{02}^2 = \frac{m\omega_0^2}{2}(x_{01}^2 + x_{02}^2). \quad (2.126)$$

В выражениях данного раздела (2.126...2.151): ω_0 – круговая частота колебаний объекта, c^{-1} ; $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, и $m = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг – его масса; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; r – расстояние между центрами диполей, м; $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Сближаясь, диполи через электромагнитные поля начнут действовать друг на друга путем изменения частот и амплитуд колебаний (рис. 2.13 а). В итоге параметры колебаний окажутся согласованными, и диполи станут совершать связанные колебания, отличающиеся по своим характеристикам от первоначальных свободных гармонических, соответствующих уравнению (2.126)

Силы f и напряженности F , создаваемые по оси X каждым диполем в отдельности, определяют по закону Кулона и принципу суперпозиции. На положительный одиночный заряд величиной e , помещенный условно вместо второго диполя в точку 2 на оси X (рис. 2.13 в), будут действовать силы f_{1+} , f_{1-} электростатических полей положительного и отрицательного зарядов первого диполя. По закону Кулона:

$$F_{1+} = \frac{f_{1+}}{e} = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 \left(r - \frac{x_{11}}{2}\right)^2}; \quad F_{1-} = \frac{f_{1-}}{e} = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 \left(r + \frac{x_{11}}{2}\right)^2}. \quad (2.127)$$

В соответствии с принципом суперпозиции сложение полученных векторов напряженностей даст вектор \vec{F}_{21} напряженности мгновенного электростатического поля, создаваемого первым диполем в точке 2. Его модуль

$$F_{21} = F_{1+} - F_{1-} = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\left(r - \frac{x_{11}}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(r + \frac{x_{11}}{2}\right)^2} \right] = \frac{2ex_{11}}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r^3 - r\frac{x_{11}}{2} + r^{-1}\frac{x_{11}^4}{16}} \right). \quad (2.128)$$

Аналогично определится вектор \vec{F}_{12} напряженности поля, создаваемого вторым диполем в точке 1.

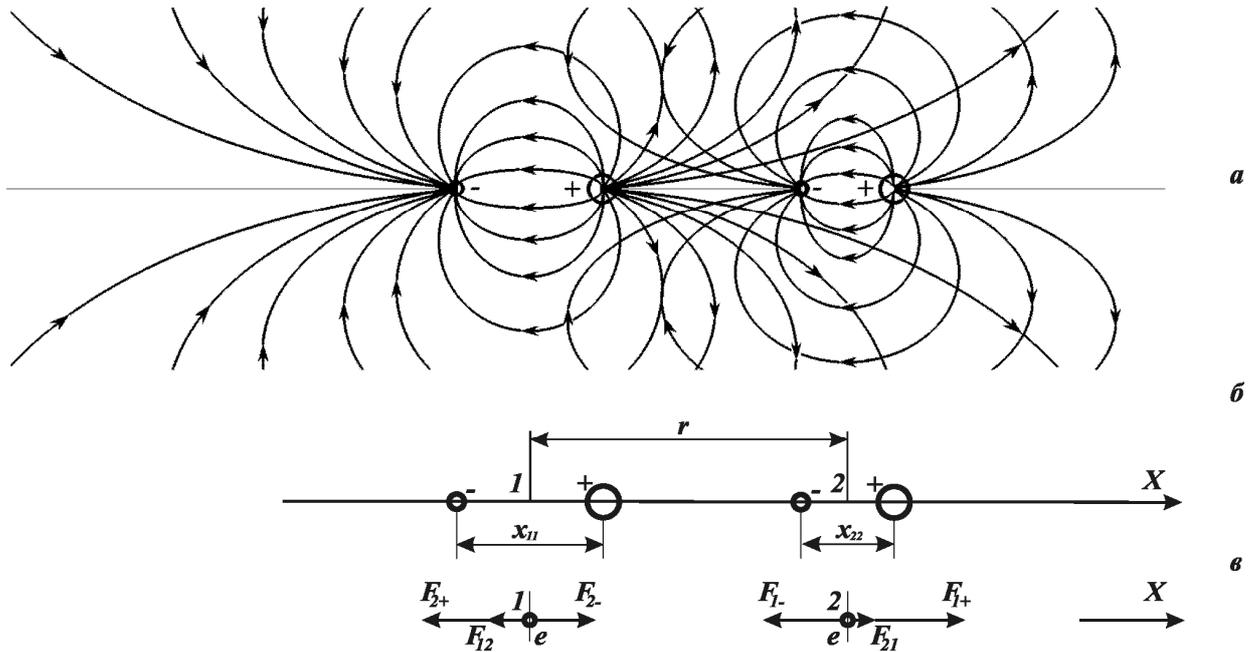


Рис. 2.13. Мгновенные распределения силовых линий диполей (а) и схемы взаимодействия зарядов (б, в). 1, 2 – мгновенные центры левого (первого) и правого (второго) диполей; x_{11} , x_{22} – их мгновенные смещения; F_1 , F_{1+} – напряженности (силы), создаваемые в точке 2 отрицательным и положительным зарядами первого диполя; F_{2-} , F_{2+} – напряженности (силы), создаваемые в точке 1 отрицательным и положительным зарядами второго диполя; F_{21} – результирующая напряженность (сила действия единицы заряда) первого диполя в точке 2; F_{12} – то же, второго диполя в точке 1

По начальному условию $x \ll r$, благодаря чему слагаемыми с x_{11}^2 и x_{11}^4 в знаменателе выражения (2.128) пренебрегают. Тогда

$$F_{21} \cong \frac{2ex_{11}}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{2\mu_{11}}{4\pi\epsilon_0 r^3}; \quad F_{12} \cong \frac{2ex_{22}}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{2\mu_{22}}{4\pi\epsilon_0 r^3}. \quad (2.129)$$

При максимальных смещениях x_{01} , x_{02}

$$F_{01} \cong \frac{2ex_{01}}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{2\mu_{01}}{4\pi\epsilon_0 r^3}; \quad (2.130)$$

$$F_{02} \cong \frac{2ex_{02}}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{2\mu_{02}}{4\pi\epsilon_0 r^3}. \quad (2.131)$$

Также при соблюдении исходного условия $x \ll r$ можно представлять энергию взаимодействия двух диполей как потенциальную энергию одного диполя в поле другого (E_{p12} или E_{p21}):

$$E_{p12} = -\mu_{01}F_{02} = E_{p21} = -\mu_{02}F_{01} = -\frac{2\mu_{01}\mu_{02}}{4\pi\epsilon_0 r^3} = -\frac{2e^2 x_{01}x_{02}}{4\pi\epsilon_0 r^3}. \quad (2.132)$$

Совместная энергия двух диполей, совершающих слабые связанные колебания, при максимальных смещениях x_{01} , x_{02} и моментах μ_{01} , μ_{02} , сложится из максимальных потенциальных энергий E_{p1} , E_{p2} каждого диполя (2.126), и максимальной потенциальной энергии их взаимодействия $E_{p12} = E_{p21}$ (2.132):

$$E = E_{p1} + E_{p2} + E_{p12(p21)} = \frac{m\omega_0^2}{2}(x_{01}^2 + x_{02}^2) - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e^2}{r^3} x_{01}x_{02}. \quad (2.133)$$

В отличие от уравнения (2.126) гармонических колебаний несвязанных диполей с отдельными координатами уравнение (2.133) содержит перекрестный (интерференционный) член с неразделенными амплитудами (произведение $x_{01}x_{02}$), и характеризует негармонические колебания. Их представляют через некоторый набор гармонических колебаний, параметры которых находят путем замены существующих координат на новые, модифицированные (нормальные) координаты ([172, 173, 174]). Нормальные моды подбираются так, чтобы после подстановки в уравнение негармонических колебаний оно приняло форму гармонических. Так, уравнение (2.133) должно принять вид:

$$E = \frac{m\omega_1^2}{2}x_1^2 + \frac{m\omega_2^2}{2}x_2^2, \quad (2.134)$$

где x_1 , x_2 – модифицированные амплитуды, ω_1 , ω_2 – модифицированные частоты, а индексы 1, 2 относятся соответственно к левому и правому диполям.

При этом модифицированные амплитуды и частоты будут равны:

$$x_1 = (x_{01} + x_{02})/\sqrt{2}, \quad (2.135)$$

$$x_2 = (x_{01} - x_{02})/\sqrt{2}, \quad (2.136)$$

$$m\omega_1^2 = m\omega_0^2 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e^2}{r^3}, \quad (2.137)$$

$$m\omega_2^2 = m\omega_0^2 + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e^2}{r^3}. \quad (2.138)$$

Обозначим безразмерный комплекс

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e^2}{r^3} \frac{1}{m\omega_0^2} = \lambda. \quad (2.139)$$

С его помощью можно представить поправочное слагаемое в (2.137, 2.138), посредством которого модифицируется исходная частота колебания осциллятора, как ее долю:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e^2}{r^3} = \lambda m\omega_0^2. \quad (2.140)$$

Используя (2.139), после обобщения (2.137), (2.138) представим ω_1 , ω_2 в следующем виде:

$$m\omega_{1,2}^2 = m\omega_0^2 \mp \lambda m\omega_0^2; \quad (2.141)$$

$$\pm\omega_{1,2} = \omega_0 \left(\pm\sqrt{1 \mp \lambda} \right). \quad (2.142)$$

Решение (2.142) является математически точным и завершенным, но полученное иррациональное выражение неудобно для физической интерпретации результата. Поэтому математические операции продолжают (приложение П2), традиционно выбирая очевидный путь избавления от иррациональности – разложение в степенной ряд, что сопровождается существенной утратой точности. Окончательное выражение для эффективной энергии взаимодействия представляют в виде бесконечного ряда:

$$E_{eff} = E_{fr} - E_{bnd} = \hbar\omega_0 \left(\frac{e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 m^2 \omega_0^4} r^{-6} + \frac{5e^8}{2048\pi^4 \epsilon_0^4 m^4 \omega_0^8} r^{-12} + \dots \right) \quad (2.143)$$

где E_{fr} – энергия нулевых колебаний двух несвязанных диполей; E_{bnd} – энергия совместных колебаний двух осцилляторов; $E_{eff} = E_{fr} - E_{bnd}$ – эффективная энергия взаимодействия; в целом по выражениям (...2.143): $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, и $m = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг – его масса; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ω_0 – круговая частота колебаний объекта, c^{-1} ; r – расстояние между центрами диполей, м; $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Представляя силу связи между квантующимися осцилляторами не унитарной, ее называют вандерваальсовыми (или дисперсионными) силами, и придают физический смысл каждому члену разложения иррационального выражения (2.142) в степенной ряд. Между тем

слагаемые компоненты эффективной энергии – члены уравнения (2.143), обратно пропорциональные расстояниям в шестой, двенадцатой и последующих степенях, появляются лишь как результат использованного в ходе решения задачи упрощения – замены унитарного и математически точного иррационального выражения (2.142) приблизительной копией в виде степенного ряда.

Задача о взаимодействии квантующихся осцилляторов традиционно решается с некоторым определенным набором упрощений, приводящих к погрешностям (которые классифицируются как неустранимые и методические), из-за чего итоговое аналитическое выражение - уравнение эффективной энергии (2.143), оказывается не столь близким к реальности, чтобы адекватно трактовать изучаемое явление.

Проведем анализ традиционного и представленного нами непосредственного решения задачи в виде уравнения (2.142) с целью оценить ошибку, вносимую разложением в ряд [175].

Для оценки величины ошибки решим задачу так, чтобы неустранимая и методическая погрешности, появляющиеся при разложении иррационального выражения (2.142) в степенной ряд, были исключены. Можно видеть, что эта иррациональность является характерной чертой осцилляторов-микрообъектов, а уравнения энергии двух колеблющихся макрообъектов (например, 2.126, 2.133, 2.134) ее не содержат. Она появляется вместе с условием квантования, именно – при замене произведения $m\omega x^2$ на \hbar , так как для микрообъектов его величина должна быть постоянной и строго определенной.

Создадим объект сравнения со степенным рядом непосредственно на основе математически точного уравнения модифицированных частот (2.142). Используем его в формуле (прил.,10.34) традиционного вывода, приведенного в прил.3, приняв для нулевых колебаний первые номера уровней энергии, соответствующие основным состояниям осцилляторов:

$$E = E_{n_1 1} + E_{n_1 2} = \frac{\hbar\omega_1}{2} + \frac{\hbar\omega_2}{2} = \frac{\hbar\omega_0}{2} \left(\pm\sqrt{1-\lambda} \pm \sqrt{1+\lambda} \right). \quad (2.144)$$

Введем безразмерные энергетические функции Λ и представим (2.144) в виде

$$\Lambda = \frac{E}{\hbar\omega_0} = \frac{\left(\pm\sqrt{1-\lambda} \pm \sqrt{1+\lambda} \right)}{2}. \quad (2.145)$$

Исследуем область определения полученного выражения. Величина энергии не должна быть комплексной (мнимой). Область действительных значений находится в пределах $-1 \leq \lambda \leq 1$. Из нее следует еще исключить недопустимое для микрообъектов значение $E=0$, которое имеет место при $\lambda=0$ и разных знаках корней в выражениях (2.144, 2.145).

В обозначенной выше области определения аргумента λ при всех сочетаниях знаков корней представлены на графике Рис. 2.14 и в Таблица 2.3. Из них должны быть исключены результаты, полученные при отрицательных знаках хотя бы одного из корней; иначе же использование полученных величин $-\sqrt{1-\lambda}$ или $-\sqrt{1+\lambda}$ в (2.142) приведет к физически нереальным отрицательным значениям частот. Поэтому физически реальный результат дает только сочетание с обоими положительными корнями – ветвь 1 кривой на рис. 2.14. График этой ветви кривой имеет максимум при $\lambda=0$ и два одинаковых минимума на границах области определения при $\lambda=\pm 1$.

Физически нереальны не только ветвь 4 рис. 2.14 и части ветвей 2,3 в области отрицательных значений энергий, но также в целом положительные части ветвей 2, 3 над осью λ ; последние получены путем сложения с отрицательным значением корня, т.е. с физически нереальными отрицательными частотами.

Заметим здесь же, что левая часть кривой 1 над значениями $-1 < \lambda < 0$ реальна, как и правая, хотя по (2.139) λ величина положительная. Однако отрицательные значения λ вполне реальны – это случай, когда мы записываем расстояние r между диполями с отрицательным знаком, отсчитывая его против направления оси X (см. рис. 2.12, рис. 2.13). В рассматриваемом примере это соответствовало бы изучению воздействия правого диполя на левый. Поэтому обе части кривой 1 (рис. 2.14) физически тождественны и могут быть совмещены.

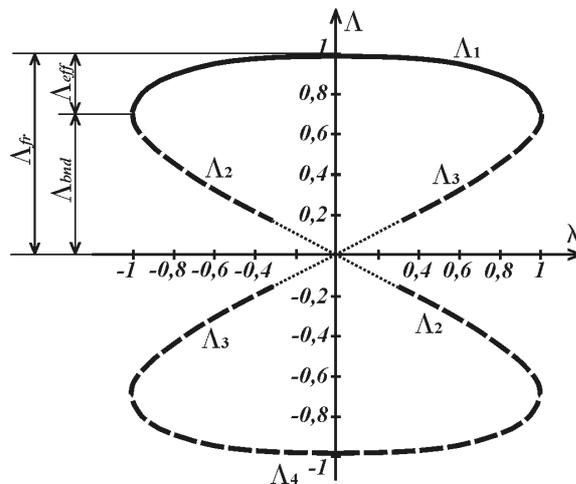


Рис. 2.14. Безразмерные энергии Λ в области определения параметра взаимодействия диполей λ

$\Lambda_{\text{eff}} = \Lambda_{\text{fr}} - \Lambda_{\text{bnd}}$; все возможные сочетания знаков в выражении $\pm\sqrt{1 \mp \lambda}$, соответствующие $\Lambda_1 \dots \Lambda_4$, приведены в таблице (таблица 2.3).

Таблица 2.3.

Зависимость безразмерной энергии Λ от параметра λ при всех возможных сочетаниях знаков в выражении $\pm\sqrt{1 \mp \lambda}$.

λ	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0
$\Lambda_{1,+ +}$	$\sqrt{2}/2$	0,894	0,948	0,979	0,995	1
$\Lambda_{2,+ -}$	$-\sqrt{2}/2$	-0,447	-0,316	-0,205	-0,100	-
$\Lambda_{3,- +}$	$\sqrt{2}/2$	0,447	0,316	0,205	0,100	-
$\Lambda_{4,- -}$	$-\sqrt{2}/2$	-0,894	-0,948	-0,979	-0,995	-1

Продолжение таблицы. Таблица 2.3

λ	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1
$\Lambda_{1,+ +}$	1	0,995	0,979	0,948	0,894	$\sqrt{2}/2$
$\Lambda_{2,+ -}$	-	0,100	0,205	0,316	0,447	$\sqrt{2}/2$
$\Lambda_{3,- +}$	-	-0,100	-0,205	-0,316	-0,447	$-\sqrt{2}/2$
$\Lambda_{4,- -}$	-1	-0,995	-0,979	-0,948	-0,894	$-\sqrt{2}/2$

Проанализируем полученный результат. Из (2.139) следует: $\lambda=0$, если $m \rightarrow \infty$, $e \rightarrow 0$ или $r \rightarrow \infty$. Первое условие есть признак макрообъекта, второе и третье очевидно указывают на отсутствие взаимодействия между электрическими полями колеблющихся диполей.

Условие $\omega_0 \rightarrow \infty$, также приводящее к $\lambda=0$: в решаемой задаче во внимание не принимается, т.к. рассматриваются только слабые (нулевые) колебания, т.е. низкие частоты. Сильные (неслабые) негармонические колебания методом модификации характеристик или каким-либо другим методом невозможно привести к гармоническим, и решить задачу аналитически не удастся. В связи с этим преобразования (2.135, 2.136, 2.137, 2.138), приводящие к (2.142), имеют смысл, если только ω_0 изначально малая постоянная величина.

Итак, $\lambda=0$ (при положительных знаках корней) есть условие отсутствия связи между макрообъектами, в рассматриваемом случае – между осциллирующими атомами-диполями.

При $\lambda=0$ на кривой 1 рис. 2.14 (см. также таблицу:таблица 2.3):

$$\Lambda_{fr} = \frac{E}{\hbar\omega_0} = 1; E = \hbar\omega_0. \quad (2.146)$$

Результат (2.146) идентичен выражению для суммарной энергии двух несвязанных диполей E_{fr} по традиционному выводу (приложение П2).

При $\lambda = \pm 1$ на кривой 1

$$\Lambda_{bnd} = \frac{E}{\hbar\omega_0} = \frac{\sqrt{2}}{2}; E = \frac{\sqrt{2}}{2} \hbar\omega_0. \quad (2.147)$$

Это минимально возможная величина Λ в области реальных λ . Она соответствует минимуму энергии системы по (прил. П2, формула П2.15), и граничное условие

$$\lambda = \pm 1 \quad (2.148)$$

оказывается еще условием образования максимально прочной связи

$$E_{eff} = \hbar\omega_0 \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \quad (2.149)$$

или в безразмерном виде (см. Рис. 2.14)

$$\Lambda_{eff} = \Lambda_{fr} - \Lambda_{bnd} \quad (2.150)$$

Очевидно, что при этом значении λ энергия E_{eff} (в безразмерном виде Λ_{eff}) будет максимально возможной, что и обеспечит максимально возможную в данных условиях прочность образующейся связи.

Решения (2.149, 2.150) получены непосредственно из выражения (2.142). Сопоставим (2.149) с аналогичным результатом (2.143), полученным путем разложения подкоренного выражения в ряд Маклорена:

$$\frac{e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 m^2 \omega_0^4} r^{-6} + \frac{5e^8}{2048\pi^4 \epsilon_0^4 m^4 \omega_0^8} r^{-12} + \dots = 1 - \frac{\sqrt{2}}{2}. \quad (2.151)$$

Следовательно, степенной ряд должен сходиться к постоянной величине $1 - \sqrt{2}/2$. Представим ряд (2.151) с учетом разложения в ряд Маклорена, приведенного в приложении П2 (выражение П2.9), в полном виде:

$$\frac{1}{8}\lambda^2 + \frac{5}{128}\lambda^4 + \frac{21}{1024}\lambda^6 + \frac{429}{32768}\lambda^8 + \frac{2431}{262144}\lambda^{10} + \dots + R_n(\mp\lambda)^n = 1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (2.152)$$

Подсчитаем величину методической погрешности из-за необходимости ограничения числа используемых членов ряда Маклорена. Если ограничимся только первым слагаемым, то

$$\frac{\lambda^2}{8} = 1 - \frac{\sqrt{2}}{2}, \text{ и} \quad (2.153)$$

$$\lambda = \pm 1,5307 \quad (2.154)$$

В этом случае ошибка превосходит 50%, а решение оказывается в области физически нереальных значений – за пределами определения λ по условиям (2.148), (2.144). Следует обратить особое внимание на этот результат еще потому, что такое приближение широко используется в квантовомеханических расчетах. Многие общепринятые расчетные потенциалы, необходимые для вычисления энергии взаимодействия и связей атомов, ионов твердой поверхности и адсорбируемых молекул, составляются подобным образом, например, потенциал Леннарда - Джонса (потенциал 6 – 12) и др. В качестве вторых слагаемых в них чаще всего применяются не вторые члены ряда (2.143), а поправки к первому слагаемому, в качестве которого используется первый член разложения, содержащий 50%-ю погрешность.

Решение квантовомеханических задач о взаимодействии диполей с учетом двух членов разложения, использующих расстояния в (-6) и (-12) степенях (см. выражение 2.151), дает значение

$$\lambda = \pm 1,2536, \quad (2.155)$$

уходящее за физически реальные пределы на 25%.

Решения с тремя

$$\lambda = \pm 1,165, \quad (2.156)$$

четырьмя

$$\lambda = \pm 1,125 \quad (2.157)$$

и пятью первыми слагаемыми

$$\lambda = \pm 1,098 \quad (2.158)$$

показывают, что погрешность, характеризующая физическую нереальность получаемых результатов, еще достаточно заметна. Увеличивать далее число используемых членов разложения нецелесообразно, поскольку темп уменьшения погрешности замедляется. Следовательно, решение задачи о нулевых колебаниях квантовых осцилляторов, полученное путем разложения иррациональности в степенной ряд, окажется в области физически реальных величин, если принять во внимание все члены ряда, включая остаточный.

Рассматривая проблему только математически, можно, договорившись о допустимой погрешности в нереальной области значений, величиной, скажем, в 3...5%, оговорить далее и обязательное для использования число членов ряда. Но использование многочленных потенциалов в квантовомеханических расчетах излишне их усложняет и математически нецелесообразно. Большое число принимаемых во внимание членов разложения неудобно и при наделении каждого из них физическим смыслом. К примеру, проведенное выше сравнение показывает, что третье слагаемое, относимое обычно за счет квадрупольных взаимодействий, приблизительно соразмерно с общепринятым для них вкладом в общую энергию связи в несколько процентов (разница между значениями λ , полученными в выражениях 2.155 и 2.156). Следующие высшие мультипольные взаимодействия, относимые к четвертому, пятому и последующим членам разложения, принято считать пренебрежимо малыми, что собственно, и должно вытекать из придаваемого им физического смысла [176]. Однако то, что их вклады (разности между значениями λ , полученными в 2.156) и 2.157), в (2.157) и (2.158), продолжают оставаться существенными, уже рационально не объяснимо.

Далее при решении поставленных задач нами будут использоваться уточненные значения энергии взаимодействия квантовых осцилляторов по выражениям 2.149, 2.150, соответствующих полученному выше условию образования максимально прочной связи (выражение 2.148).

2.5.3 Учет уточнения решения задачи о дисперсионных силах в расчетах фонтанирующего режима полидисперсного материала для десульфуризации и других процессов чистых технологий угольной генерации

Среди устройств с различными способами организации взвешенного слоя (кипящий слой, восходящий пневмотранспорт) установки с фонтанирующим материалом обладают рядом преимуществ. Основное из них заключается в обеспечении стабильности взвешенного слоя для полидисперсного материала в широком диапазоне размеров частиц (ориентировочно от $30 \cdot 10^{-6}$ до $30 \cdot 10^{-3}$ м).

Фонтанирующий режим измельченных материалов в цилиндрических аппаратах образуется при нижней центральной подаче струи газа-носителя под слой зернистого материала в конических и цилиндроконических аппаратах. Подобные аппараты могут применяться при угольной генерации в процессах сушки углей любого размера, от пылевидного до рядового. Высока эффективность фонтанирующего режима в системах обработки газоздушных потоков производственных зданий ТЭС различного назначения при необходимости применения процессов хемосорбции, т.е. в условиях быстрого насыщения адсорбента до состояния, близкого к равновесному. Так как время контакта адсорбента с обрабатываемым газом ограничено габаритами (стоимостью) аппарата, подвижность слоя позволяет создавать малогабаритные аппараты с непрерывной заменой части адсорбента.

Подобные системы могут использоваться для дегалогенизации воздушных выбросов помещений КРУЭ, а также для десульфуризации продуктов сгорания твердых и жидких топлив на ТЭС для удешевления технологий, отвечающих требованиям отмеченных выше евростандартов LCP, или программ США по чистым угольным технологиям

В последнее время распространение аппаратов с фонтанирующим слоем в различных областях техники заметно замедлилось, а в сфере энергетики и не переступило стадии отдельных НИОКР. Одна из сдерживающих причин заключается в недостаточной надежности расчетной базы применительно к реальным процессам, хотя со времени первых исследований режимов фонтанирования, выполненных К.Б. Мазуром (Mathur K.B.) с соавторами, прошло более полувека.

Для их оптимального конструирования и эффективной эксплуатации необходима достоверная информация о параметрах стадий фонтанирования. Параметры фонтанирования зернистых материалов специфичны и существенно отличаются от других видов взаимодействия газового потока и с неподвижными твердыми частицами, как при фильтрации, и с подвижными, как в режимах псевдооживления и пневмотранспорта. Наиболее характерными параметрами являются: расход и максимальное давление газа при фильтрации через

неподвижный слой; давление и минимальная скорость газа в начале фонтанирования; давление и максимальная скорость газа перед началом пневмотранспорта частиц из слоя. Теоретические и эмпирические зависимости, позволяющие определять их, получены, как правило, для слоев из элементов одинакового размера и формы.

Пределы режима устойчивого фонтанирования по скорости газового потока заключены в интервале между максимальной скоростью, соответствующей началу циркуляции частиц, и скоростью их пневмотранспорта. Граничные значения скоростей потока зависят от формы, размеров и физических свойств частиц, параметров газового потока, геометрии аппарата и множества других факторов. Существует ряд теоретических и эмпирических зависимостей для расчетного определения параметров фонтанирования, однако они не всегда надежны в применении к реальному проектированию. Теоретические соотношения исходят из весьма упрощенных моделей, а эмпирические ограничены условиями эксперимента и малопригодны для экстраполяции, поскольку получены как правило для слоев, состоящих из одинаковых по форме и размерам элементов.

Аэродинамическое сопротивление слоя засыпки монодисперсных материалов и параметры потоков в характерных точках режима фонтанирования исследованы многими авторами. В отечественной литературе прошлого периода наилучшие обобщения теории фонтанирования и ее приложений к промышленным процессам были представлены в [177, 178]. Предложен ряд эмпирических расчетных зависимостей для определения присущих только фонтанирующему слою режимных параметров.

Много работ, в т.ч. [177, 178, 179], посвящено объяснению возникновения пика давления в неподвижном слое до начала фонтанирования засыпки. В ряде работ (напр., [180]) предпринята попытка теоретического обоснования этого явления. Условия потери устойчивости подробно исследованы многими авторами как с точки зрения аэродинамики процесса фонтанирования, так и с точки зрения механики сыпучих материалов. В работе ([178]) получены формулы для расчета максимального давления, а также проанализированы и приведены данные других авторов. Во многих работах исследованы границы режимов фонтанирования после прихода слоя засыпки в движение.

Однако параметры режима исследуются в основном на модели фонтанирования монофракционных материалов. Вместе с тем для реальных производственных процессов в сфере энергетики и промышленности характерно использование полифракционного сыпучего материала. Существующие способы учета полидисперсности по сути основаны на аддитивном вычислении параметров системы с подстановкой медианного диаметра полифракционной смеси в формулы, полученные при исследовании монофракционных материалов. Сравнение

результатов экспериментальных исследований полидисперсной фонтанирующей системы с расчетами по формулам для монодисперсных слоев показывает, что расхождение опытных и расчетных данных составляет 200...400 %. Следовательно, процессы фонтанирования моно- и полидисперсных частиц имеют качественные различия и, по-видимому, не могут быть совмещены в рамках правила аддитивности. Расчеты по среднему диаметру предполагают, что искомое свойство неоднородной системы адекватно определяется по правилу аддитивности. Это может быть справедливо при расчетах экстенсивных свойств. Модель аддитивности может давать близкие к реальным результаты в процессах, происходящих без перестройки межатомных и межмолекулярных связей. К примеру, по аддитивности можно достаточно точно подсчитать экстенсивные свойства близких по физико-химическим характеристикам гомогенных смесей веществ в состояниях, далеких от фазовых переходов. Исследования возможности использования среднего диаметра и правила аддитивности для вычисления параметров фонтанирования полифракционной смеси системы [181] показали, что принцип аддитивности в применении к полидисперсным смесям не может служить надежной основой вычисления даже такого экстенсивного свойства, как плотность. Между тем это важнейшая характеристика измельченных материалов, входящая во все расчетные зависимости по определению параметров фонтанирования.

При описании различных стадий процессов фонтанирования используются истинная, насыпная и кажущаяся плотности сыпучего материала. Истинная плотность, как масса единицы объема вещества частиц, определяется достаточно точно, однако посредством нее можно охарактеризовать лишь свойства гладких монолитных частиц в неподвижном слое. Параметры, связанные с перестройкой структуры неподвижного слоя и переходом в подвижное состояние, в определенной степени характеризуются насыпной плотностью, а параметры развитого режима фонтанирования – кажущейся.

Насыпная плотность монодисперсных материалов определяется достаточно просто посредством измерения массы свеженасыпанных частиц в сосуд с известным объемом. Ее измеренная величина зависит от ряда случайных факторов, влияющих на первичную упаковку частиц, а в конечном счете – на величину промежутков между частицами. Это влияние можно до некоторой степени уменьшить при статистической обработке опытных данных. Фактор случайности первичной упаковки полидисперсной массы сказывается намного сильнее, приводя к расхождению результатов замеров. Причиной этому служит переупаковка и переуплотнение смеси вследствие просачивания мелких частиц через промежутки между частицами более крупных фракций за промежуток времени от заполнения измерительного сосуда до взвешивания. Очевидно также, что для полидисперсной системы нахождение

насыпной плотности по правилу аддитивности нецелесообразно. В общем случае насыпная плотность смеси не будет соответствовать величине, вычисленной по сумме долей от насыпной плотности каждой фракции, пропорциональных их содержанию. Поэтому средний диаметр не может служить параметром, адекватно характеризующим условия потери устойчивости такого слоя.

Кажущуюся плотность отдельной частицы можно определить достаточно точно, измерив ее массу и занимаемый объем с использованием жидкости, не смачивающей частицу и не занимающей открытых пор. Этот параметр используется для характеристики частиц в потоке и может быть использован в расчетных зависимостях как показатель инерционных свойств частиц монодисперсного материала во взвешенном состоянии в условиях развитого режима фонтанирования. Кажущаяся плотность частицы усредненного размера, найденная опытным путем или вычисленная аддитивно, не может адекватно отображать инерционные свойства системы, состоящей из частиц различных размеров. Опытное нахождение кажущейся плотности для определенного множества частиц полидисперсной системы в принципе возможно. Однако на практике воспроизводимость результатов получается очень низкой. Возможно, такой параметр не может объективно соответствовать и адекватно отображать инерционные свойства всей совокупности частиц, находящихся в данный момент во взвешенном состоянии, т.к. средний размер взвешенных частиц, и с ним – средние характеристики всей совокупности, стохастическим образом изменяются во времени. Подсчет режимных параметров по среднему диаметру этого не учитывает.

Таким образом, в целом вопрос о параметрах, определяющих формирование свойств полидисперсной смеси на различных стадиях процесса фонтанирования, в настоящее время разработан слабо. Экстенсивные свойства сыпучих веществ в режиме перестройки слоя при переходе от фильтрации к фонтанированию наиболее близко к реальности могут быть отображены насыпной плотностью, а в режиме устойчивого фонтанирования – кажущейся. При этом они должны соответствовать свойствам одиночных частиц лимитирующего размера. Размеры частиц, определяющих параметры фонтанирования полидисперсного материала, специфичны для каждого режима. Для развитого фонтанирования это размер наибольшей фракции, а для режима с максимальной скоростью – наименьшей. Размер частиц, лимитирующих переход от фильтрации к фонтанированию, для полидисперсной смеси заранее неизвестен. пока недостаточность разработки вопроса, о параметрах частиц, лимитирующих характеристики переходов полидисперсной смеси от одной стадии фонтанирования к другой, показывает и сравнение результатов расчетов с опытом.

Расчеты максимальных давлений в неподвижном слое с использованием средних диаметров полидисперсных смесей в эмпирических зависимостях, полученных для монодисперсных частиц, дают завышенные в 2,5...4 раза значения по сравнению с экспериментально наблюдаемыми. При этом полидисперсная система упаковывается плотнее, чем монодисперсная. Поэтому при одинаковом материале и высоте засыпки ее масса в конусе аппарата будет больше, чем монодисперсной. Следовательно, средний диаметр и аддитивная плотность полидисперсной засыпки не являются адекватной характеристикой реальных экстенсивных и инерционных свойств полидисперсной засыпки, лимитирующих переход неподвижного полидисперсного слоя в подвижное состояние. Иначе наблюдаемые давления должны были бы превосходить рассчитанные по среднему диаметру. Достоверное нахождение лимитирующего размера полидисперсной системы должно обеспечить адекватность вычисления параметров ее фонтанирования.

Меньшие значения экспериментально наблюдаемых давлений в полидисперсном слое указывают также на меньшую затрату энергии при перестройке его структуры по сравнению с монодисперсным. Более легкая перестройка структуры полидисперсного слоя объясняется тем, что напряжения в слоях из одинаковых, и, как правило, гладких шарообразных частиц, используемых в экспериментах с монодисперсной засыпкой, распределяются равномерно. Весь слой представляет равновесную структуру, составленную из одинаковых фрагментов – шарообразных частиц и пустот между ними, которую можно назвать псевдомонолитной. Для того, чтобы вывести ее из равновесия, необходимо, чтобы все связи между частицами в некоторой области вокруг точки приложения внешней силы были насыщены энергией, превышающей энергию связей частиц, удерживающую систему в равновесии.

Приложенная центрально и направленная снизу вверх внешняя сила механического воздействия газового потока на неподвижный сухой сыпучий материал при отсутствии других внешних воздействий уравнивается силой, создаваемой тяжестью частиц и межмолекулярным взаимодействием их поверхностных структурных элементов. Определенная доля внешней силы и силы тяжести передается на межмолекулярные связи и диссипирует, что выражается в увеличении амплитуд и частот колебаний поверхностных атомов и ионов, их поляризации, деформации поверхностных слоев, и в итоге – в росте адгезии частиц. Влияние межмолекулярного взаимодействия существенно для субмиллиметровых фракций частиц и возрастает с уменьшением их размера.

Равномерно упакованная система одинаковых сферических элементов требует максимальной затраты работы на нарушение связей, удерживающих ее в равновесии, т.к. внешняя сила, приложенная в одной точке системы, распределяется по всем ее связям,

имеющим приблизительно одинаковые величины энергии. Вывод из состояния равновесия полидисперсной хаотически упакованной системы требует меньших затрат энергии. Внешние силы здесь также распределяются по множеству связей. Однако связи энергетически не равнозначны. Для нарушения равновесия системы достаточно нарушить слабейшую связь. Легче поддались бы эрлифту самые мелкие фракции засыпки, но сила их межмолекулярного взаимодействия максимальна в данной системе (ориентировочно она обратно пропорциональна шестой степени отношения диаметров частиц). Крупные же фракции обладают наибольшей скоростью витания. Очевидно, при начальном минимальном усилии будут приведены в движение частицы промежуточного или минимального размера. Их место займут более крупные частицы. Таким образом равновесное состояние слоя нарушится, и он будет приведен в движение. Затем система может обрести новое состояние равновесия или перейти в режим фонтанирования, что зависит от материала, формы и дисперсного состава частиц, величины внешней энергии, параметров газа и других факторов.

Характеристики режима фильтрации газа, подготавливающего структуру слоя к фонтанированию, специфичны для совокупностей частиц различных материалов и размеров. Основные свойства конкретных фракций полидисперсной системы и частиц усредненного размера не тождественны. Вместе с тем учет специфичных свойств каждой фракции в теории и на практике затруднителен. Размеры частиц, адекватно определяющих параметры перехода в режим фонтанирования, можно получить из условия нарушения равновесия между внешней силой и силами тяжести и межмолекулярного взаимодействия. Для реальных условий, при обработке влажного материала или газа, в удержании системы в равновесии будет существенным и вклад капиллярных сил.

Свойства совокупностей частиц различных материалов и фракций в режимах фильтрации газа-носителя, предшествующих началу фонтанирования, специфичны и иногда имеют противоположный характер. Порозность сыпучих материалов с размерами 30...150 мкм и невысокой плотностью (порядка 1000...3000 кг/м³) растет с увеличением расхода газа-носителя вплоть до начала фонтанирования. Если размеры частиц менее 30 мкм, то значительный рост аутогезионных свойств приводит к тому, что фильтрация происходит не по всему объему, а с образованием каналов по месту подвода газа-носителя. Порозность слоя частиц размером 150...500 мкм несколько увеличивается в начале продувки, а затем остается постоянной и не зависит от расхода газа-носителя. Порозность слоя частиц большого размера или с высокой плотностью (крупные металлические опилки, дробь) не изменяется до начала фонтанирования.

Перечисленные свойства частиц различных фракций для полидисперсных систем не могут быть определены аддитивно. Теоретические и экспериментальные исследования должны основываться на учете специфических свойств каждой фракции. При этом для каждого из характерных режимов фонтанирования должны быть найдены свои определяющие размеры частиц и их вклады в общую энергию системы. Данное положение во многих случаях ограничивает реальную возможность применения процессов с фонтанирующим слоем. К примеру, в практике чистых угольных технологий в энергетике сейчас наиболее прогрессивными для забалластированных углей считаются парогенераторы со сжиганием в циркулирующем кипящем слое (ЦКС), хотя они и имеют ряд существенных конструктивных недостатков [110, 110, 182]. Принципиально все они легко устранимы при организации сжигания в фонтанирующем слое дробленого топлива.

Между тем некоторые задачи, связанные со сжиганием топлива в фонтанирующем режиме, не относятся к легко разрешимым. Заметим, что генераторы с ЦКС уже не одно десятилетие эксплуатируются в энергетике и промышленности, тогда как устройства с фонтанированием зернистого материала все еще преодолевают стадии НИОКР. Одна из причин, сдерживающих развитие технологий и устройств с фонтанирующим режимом по всем направлениям возможного применения – недостаточная надежность расчетных методов определения режимных параметров, и как следствие – отсутствие прозрачных методик, пригодных для проектных расчетов реальных процессов с полидисперсным материалом. При адаптации фонтанирования к процессам сжигания кускового топлива возникают определенные вызовы даже из-за свойств, обычно рассматриваемых как преимущество этого способа организации движения зернистого материала. Касательно использования топливных углей одно из таких – возможность организации режима фонтанирования для широкого диапазона размеров частиц, от пыли с диаметром в несколько десятков микрометров до крупных кусков совмещенного класса ОМСШ. Однако при этом перемещение частиц дробленого топлива в топке необходимо организовать таким образом, чтобы они не достигали поворотной камеры. Гарантированный запас должен обеспечиваться проектными расчетами: подача воздуха на горение должна быть такой, чтобы скорость потока дымовых газов в верхней части топки была ниже скорости витания частиц. Это приводит к необходимости обоснованного выбора в расчетах надлежащего размера элементов фонтанирующей системы, с учетом потери первоначальной массы топливного элемента от его частичного сгорания. При этом принятый размер должен быть таким, чтобы остаток окончательно догорал на нисходящей траектории по возвращении в слой, а частицы меньших фракций полностью сгорали на восходящей траектории за время пребывания в топочном пространстве. Частицы же более крупных фракций

будут раньше начинать нисходящее движение из-за большей скорости витания, и их характеристики определяющей роли в расчетах играть не будут. Лимитирующий размер частиц, по которому при заданной производительности по топливу (и, следовательно, по подаче воздуха на горение) определится живое сечение решетки и поперечное сечение топки, может быть в первом приближении определен по скорости витания наиболее крупной из фракций, успевающих полностью сгореть за время пребывания в топке до поворотной камеры.

Найдем определяющие размеры частиц в режиме, соответствующем потере устойчивости слоя полидисперсной засыпки и переходу к фонтанированию, из следующего условия. Нарушение равновесного состояния полидисперсной засыпки начнется с частиц некоторого лимитирующего размера D_{lim} , скорость витания которых окажется ниже действительной скорости потока по месту их расположения в неподвижном слое. Энергии потока должно быть достаточно и для преодоления аутогезионного взаимодействия частиц этого размера. При их эрлифте частицы следующего, более крупного, размера D_{lim+1} , еще остаются неподвижными, но имеют уже достаточную порозность. Исходя из этого, можно принять, что сила, необходимая для нарушения равновесия, должна превосходить силы тяжести и всех взаимодействий частиц фракции, включающей лимитирующий размер, но остается еще меньше силы тяжести частиц более крупной фракции.

Между частицами субмиллиметрового диапазона можно считать существенными межмолекулярные и капиллярные взаимодействия. Форму зависимости энергии вандерваальсовых взаимодействий E_{VdW} от расстояния получают из приближенного решения задачи о нулевых колебаниях атомов водорода как квантующихся осцилляторов: $E_{VdW} = \hbar\omega(1 - Cl^n)$ Дж. В этом выражении l , м – расстояние между центрами взаимодействующих молекул как колеблющихся мультиполей; $\hbar\omega$, Дж – постоянная Липшица – Ван дер Ваальса, значение которой зависит от вида взаимодействующих веществ. В предыдущем разделе было показано, что такие зависимости содержат существенную погрешность, которую в практике расчетов исправляют путем эмпирического подбора показателя степени n и коэффициента C

По [154], для твердых материалов в воздушной среде $\hbar\omega = (1,6 \dots 16) \cdot 10^{-19}$ Дж на пару взаимодействующих элементов, или $\hbar\omega_N = (4,8 \dots 48) \cdot 10^7$ Дж на 1 кмоль таких пар. Необходимо также учесть, что пары контактирующих структурных единиц материала (атомов, ионов) располагаются на поверхностях частиц. Доля поверхностных единиц по отношению к их общему числу в пределах размеров частиц 60-700 мкм согласно [183] $s = 10^{-6} - 0,7 \cdot 10^{-8}$. В [184] указывается на ослабление вандерваальсового взаимодействия из-за того, что вследствие неровностей не все пары поверхностных элементов соприкасающихся частиц находятся на равновесных расстояниях. С учетом коэффициента ослабления $l = 5 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$ и числа

взаимодействующих пар $N=(N_A/2) \cdot s \cdot l$ получим для засыпки из частиц размером 700 мкм $\hbar\omega = \hbar\omega_N \cdot s_{700} \cdot l_{700} = 3,36 \cdot 10^{-2} - 3,36 \cdot 10^{-1}$ Дж/кмоль, и частиц размером 60 мкм $\hbar\omega = \hbar\omega_N \cdot s_{60} \cdot l_{60} = 2,4 - 24$ Дж/кмоль. В той же работе зависимость для расчета силы вандерваальсовых взаимодействий между сферическими частицами радиусом R представляется в виде:

$$F_{vdw} = R E_{vdw} / (4r^2), \quad (2.159)$$

где r – расстояние между частицами.

Со значением $E_{vdw} = \hbar\omega(2 - \sqrt{2})/2$, полученным из уточненного решения задачи о нулевых колебаниях (выражение 2.149, [67]), представим (2.159) в виде:

$$F_{vdw} = R E_{vdw} / (4r^2) = R \hbar\omega(2 - \sqrt{2}) / (8r^2). \quad (2.150)$$

Оценив в ней $\hbar\omega_0$ по общепринятым значениям, можно подсчитать, что сила вандерваальсовых взаимодействий составит порядка 100 Н на I моль вещества.

В режиме фильтрации газа-носителя через измельченный материал возможна конденсация водяных паров с образованием в местах контакта прослоек капельной жидкости. Капиллярное взаимодействие, удерживающее частицы за счет поверхностного натяжения ([154]),

$$F_{\sigma} = 8 \sigma R, \quad (2.161)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м.

При влажности газа-носителя более 80 % капиллярное взаимодействие может стать больше вандерваальсового взаимодействия частиц, а их совместная сила – превзойти силу тяжести частиц.

В отдельных случаях может возникнуть необходимость учета зацепления частиц между собой. В частности, они могут быть существенными для частиц, форма которых сильно отличается от сферической. В таких системах сцепления будет затруднять не только перемещение вверх частиц размером менее 30 мкм, но и переупаковку более крупных частиц. Исследований, позволяющих выполнить расчеты или определить форму зависимости силы сцепления от различных факторов, нет. Для оценки порядка ее величины можно воспользоваться классификацией сыпучих материалов по Е.И. Андрианову [185], в соответствии с которой для шамотных частиц эта сила не превышает 60 Па. Форму выражения аутогезионной силы F_a можно представить аналогично капиллярной силе

$$F_a = f_a R \quad (2.162)$$

где f_a – удельный параметр, характеризующий поверхностное сцепление частиц, Н/м.

В целом вопрос потери устойчивости полидисперсной системы при центральном нижнем подводе воздуха подробно рассмотрен автором в работах [186, 187]. В общем случае необходимая для нарушения равновесия величина внешней силы, действующая вертикально, должна удовлетворять условию:

$$F = F_{VdW} + F_{\sigma} + P_{\text{lim}} < P_{\text{lim}+1}, \quad (2.163)$$

или

$$R_{\text{lim}} \hbar \omega (2 - \sqrt{2}) / 8r^2 + 8\sigma R_{\text{lim}} + 4\pi R_{\text{lim}}^3 \rho_{\text{lim}} g / 3 < 4\pi R_{\text{lim}+1}^3 \rho_{\text{lim}+1} g / 3, \quad (2.164)$$

где $P_{\text{lim}}, P_{\text{lim}+1}, R_{\text{lim}}, R_{\text{lim}+1}, \rho_{\text{lim}}, \rho_{\text{lim}+1}$ – соответственно, вес, H , радиусы, m и насыпные плотности, кг/м^3 , частиц лимитирующей и последующей фракций.

Равновесные расстояния вандерваальсового взаимодействия значительно меньше размеров частиц, ввиду чего считаем расстояние между их центрами r приблизительно равным $2R$. Приняв еще, что для одного и того же материала $\rho_{\text{lim}} = \rho_{\text{lim}+1} = \rho_p$, и обозначив $R_{\text{lim}+1}/R_{\text{lim}} = \varphi$, преобразуем (2.164) и получим условие нарушения равновесия полидисперсной системы в энергетическом представлении:

$$4\pi R_{\text{lim}}^4 \rho_p g (\varphi^3 - 1) / 3 - (8\sigma + f_a) R_{\text{lim}}^2 - \hbar \omega (2 - \sqrt{2}) / 32 > 0. \quad (2.165)$$

Выражение (2.165) позволяет получить условие потери устойчивости неподвижной полидисперсной системы в виде безразмерного параметра LS (Loss of Stability):

$$LS = 2244,76 R_{\text{lim}}^4 \rho_p (\varphi^3 - 1) / (437,02 \sigma R_{\text{lim}}^2 + \hbar \omega) > 1. \quad (2.166)$$

При продувке неувлажненных измельченных материалов, состоящих из частиц компактной формы, осушенным газом наиболее существенны вандерваальсовы взаимодействия и силы тяжести частиц. Тогда выражение (2.166) можно представить в виде:

$$LS = 2244,76 R_{\text{lim}}^4 \rho_p (\varphi^3 - 1) / \hbar \omega > 1. \quad (2.167)$$

При высокой влажности частиц и/или продуваемого газа капиллярное взаимодействие может стать больше вандерваальсового. Тогда потерю устойчивости слоя можно оценивать по энергии, необходимой для разрыва связей капиллярного взаимодействия, и по механической энергии потока на преодоление силы тяжести. Выражение (2.166) преобразуется в

$$LS = 5,14R_{\text{lim}}^2 \rho_p (\varphi^3 - 1) / \sigma > 1 \quad (2.168)$$

Условие потери устойчивости полидисперсной системы позволяет также находить соотношение определяющих размеров частиц минимальной и последующей фракций R_{lim} и $R_{\text{lim}+1}$. Если преимущественно капиллярное взаимодействие, то в соответствии с (2.168):

$$R_{\text{lim}} > \pm 0,44 \sqrt{\sigma / [\rho_p (\varphi^3 - 1)]} \quad (2.169)$$

При преимущественно вандерваальсовом взаимодействии, из (2.167),

$$R_{\text{lim}} > \pm 0,145 \left\{ \hbar \omega / [\rho_p (\varphi^3 - 1)] \right\}^{0,25} \quad (2.170)$$

Если учитываются капиллярные и вандерваальсовы взаимодействия, то

$$R_{\text{lim}} > \pm 0,312 \sqrt{\frac{\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 + 0,047 \rho_p (\varphi^3 - 1) \hbar \omega}}{\rho_p (\varphi^3 - 1)}} \quad (2.171)$$

В общем случае

$$R_{\text{lim}} > \pm 0,109 \sqrt{\frac{8\sigma + f_a \pm \sqrt{(8\sigma + f_a)^2 + 3\rho_p (\varphi^3 - 1) \hbar \omega_0}}{\rho_p (\varphi^3 - 1)}} \quad (2.172)$$

Полученные выражения содержат несколько корней. В частности, из 4 корней зависимостей (2.170, 2.171, 2.172) два комплексных и один действительный отрицательный. Но при $\varphi > 1$ каждое из выражений дает по одному действительному положительному корню, что

удовлетворяет физическим условиям решаемой задачи и свидетельствует о теоретической однозначности получаемого решения. Поэтому учитываются только действительные положительные корни, которые удовлетворяют неравенствам (2.169, 2.170, 2.171, 2.172) и решаемой задаче.

Необходимо вместе с тем обратить внимание на то, что эти зависимости могут давать недостаточно объективные результаты, если отношение φ близко к 1. Такие случаи характерны для сыпучего материала, гранулометрический состав которого приближается к монодисперсному, что может иметь место, например, при обработке воздуха адсорбентом, изготовленным в виде гранул или таблеток, при сушке зерновых культур или отдельной фракции классифицированного материала. Тогда R_{lim} может стать неадекватно большим, а в соответствии с выражениями (2.171, 2.172) – еще и математически неопределенным. Однако значение $\varphi=1$ не соответствует условиям поставленной задачи. В данной работе рассматриваются характеристики полидисперсной засыпки, значение φ для которой существенно отличается от 1. Для определения параметров фонтанирования монодисперсных или близких к ним по гранулометрическому составу сыпучих материалов рассчитывать значение R_{lim} , очевидно, не имеет смысла. Используемый для расчетов требуемых параметров характерный размер элементов подобных засыпок известен заранее.

Если в засыпке находятся частицы, отличие в размерах которых стремится к 0, то такая полифракционная смесь будет бесконечно мало отличаться от монофракционной. Следовательно, усилия, поднимающего частицы размером R_{lim} , будет достаточно и для подъема частиц размером R_{lim+1} . В разработанной модели полагается, что вес последующей фракции превосходит вес предыдущей и все перечисленные выше силы сцепления между частицами предыдущей фракции. Эта предпосылка исходит из очевидного факта: потеря устойчивости структуры конусной засыпки происходит при минимально возможном для данной структуры усилии. Следовательно, его хватает на подъем и отрыв от остального слоя частиц строго определенной для данной структуры конусной засыпки фракции. Причем это не обязательно наименьшая фракция данной засыпки, т.к. с уменьшением размера фракции растет сила межмолекулярного взаимодействия частиц. Поэтому величина лимитирующего размера частиц, сдвиг которых приводит к потере устойчивости всего слоя, заранее неизвестна. Вычислив ее по выражениям (2.169, 2.170, 2.171, 2.172), легко найти соответствующую скорость витания, а по ней – энергию, требуемую для начала фонтанирования слоя полифракционной засыпки.

2.5.4 Параметры термообработки галогенсодержащих загрязнителей выбросов помещений КРУЭ

Выбор схемы обезвреживания отбросных газов в основном определяется их составом и количеством. Иногда в технологических процессах образуются горючие углеводородные отходы с низким содержанием кислорода. Схемы и методы их обезвреживания сходны со способами сжигания топливных газов, но подбираются индивидуально в зависимости от вида горючего загрязнителя, его концентрации, физико-химических свойств [100].

Другой вид производственных выбросов, в принципе поддающихся обезвреживанию термоокислением – отработанные потоки выбросов, загрязненные горючими токсичными веществами, молекулы которых состоят из атомов *C*, *O*, *H*. Они могут обрабатываться в специально сконструированных или обычных технологических печах, а также в топках котельных установок. Выбросы некоторых технологических процессов бывают настолько загрязнены горючими веществами, что их концентрации время от времени могут достигать нижнего предела воспламенения. Подобные выбросы можно сравнительно легко и эффективно обезвредить в несложных топочных устройствах с пилотным пламенем для поддержания горения при возможных понижениях концентрации загрязнителей. Чаше содержание горючих веществ в производственных выбросах невелико, и выделяемого при окислении тепла недостаточно для самовоспламенения загрязнителей. Для обеспечения их полного термоокисления (полного сгорания) за технически приемлемый промежуток времени приходится прогревать до температуры самовоспламенения весь объем выбросов. Экологически целесообразным источником внешнего тепла в этом случае является газообразное топливо.

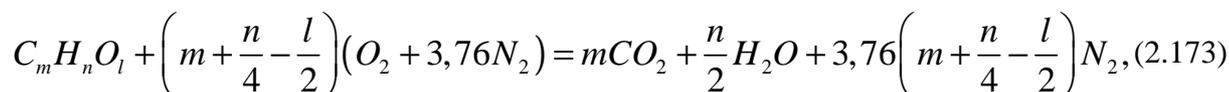
Вместе с тем использование газового или другого топлива в установках термообезвреживания всегда обращается в экономическую проблему, так как количество загрязненных выбросов, требующих термообработки, может исчисляться десятками и сотнями кубических метров в секунду. Поэтому для систем термоокисления имеют значение и применяются при разработке все средства, позволяющие экономить топливные ресурсы. Одно из радикальных средств - использование отбросных газов в качестве выбросов для горения с подачей их в воздушные тракты горелочных устройств ([188, 189, 190, 191, 192, 193,]). Методы расчетов конструктивных и режимных характеристик при этом зависят от вида и состава отбросных газов.

Если суммарная массовая концентрация всех горючих компонентов отбросных газов $\sum_{i=1}^N g_i$, не превышает $0,5 \cdot 10^{-4}$ кг/м³, расчеты можно проводить так же, как и при сжигании

традиционного топлива с обычным воздухом. Если $\sum_{i=1}^N g_i > 10^{-4}$ кг/м³, необходима корректировка обычных формул, а при концентрациях горючих загрязнителей более $(2...2,5) \cdot 10^{-4}$ кг/м³ поправки становятся соизмеримыми с характеристиками сжигания традиционного топлива.

Стехиометрические уравнения и балансовые расчеты

Теоретическая потребность в воздухе и объемы продуктов реакции полного окисления органического соединения, молекулы которого состоят из m атомов углерода, n атомов водорода и l атомов кислорода, определяются из аналогичного стехиометрическому соотношению (2.6) уравнения



согласно которому на полное окисление одного объема обезвреживаемого парообразного соединения $C_m H_n O_l$ необходимо затратить

$$V_t = 4,76 \left(m + \frac{n}{4} - \frac{l}{2} \right) \quad (2.174)$$

объемов выбросов. При этом образуется

$$V_{wfg} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} = 4,76 \left(m + 1,21 \frac{n}{4} - 0,79 \frac{l}{2} \right) \quad (2.175)$$

объемов влажных продуктов сгорания. Величины V_t и V_{wfg} называются теоретическими объемами выбросов и продуктов сгорания.

Для индивидуальных веществ точность балансовых расчетов соответствует точности стехиометрического уравнения. Хотя уравнение (2.173) несколько упрощено (не учтены реакции диссоциации CO_2 и H_2O , которые становятся заметными при температурах выше 1000⁰С, а также реакции окисления азота выбросов), для теплотехнических расчетов его точность в таком виде достаточна. Вместе с тем в расчетах всегда учитывается действительное количество выбросов V_r , поступающее в зону горения, которое должно превосходить теоретически необходимое.

Для полного окисления органической части выбросов теоретически необходимым количеством выбросов V_t , пришлось бы обеспечить перемешивание загрязнителя и выбросов на молекулярном уровне, причем таким образом, чтобы у каждой молекулы $C_m H_n O_l$ находилось

$m+n/4-l/2$ молекул O_2 . Можно избежать ненужных усложнений, если подавать окислитель с некоторым избытком. Коэффициент избытка выбросов α , в общем случае определяемый как отношение действительного количества выбросов к теоретически необходимому V_r / V_t , зависит от вида сжигаемого топлива, конструкций топок и горелочных устройств, назначения топливоиспользующей установки. При сжигании газообразного топлива в топках котлов и технологических печей (за исключением печей с регулируемой атмосферой) α принимают обычно в пределах 1,02 ... 1,25. В установках термообезвреживания, использующих отбросные газы в качестве выбросов для горения, с целью экономии топлива назначают максимально возможные избытки выбросов, стараясь поддерживать $\alpha > 2$. Особенности определения избытков выбросов для таких установок рассмотрены в последующих разделах.

Обычно приходится рассчитывать параметры сжигания смеси горючих компонентов, а не отдельного вещества. Тогда в расчеты вводятся дополнительные упрощения, так как правила, по которым формируются свойства реальных смесей, не всегда очевидны или известны.

Принято находить параметры смесей наиболее простым способом – по правилу аддитивности, подсчитывая количественную характеристику искомого свойства смеси сложением количественных характеристик этого свойства компонентов, пропорционально их содержанию в смеси.

Для смеси N горючих компонентов теоретически необходимое количество воздуха определится как $V_t = \sum_{i=1}^N V_{t_i} r_i$.

О пределах применимости правила аддитивности в расчетах параметров термоокисления

Расчеты по правилу аддитивности позволяют с хорошим приближением вычислять количественные характеристики свойств, не связанных с преобразованием межмолекулярных (вандерваальсовых) или межатомных (химических) связей, для смеси частей одного вещества или для смеси веществ с близкими физико-химическими свойствами, например, принадлежащих к одной группе химических соединений. В частности, его применение вполне корректно, когда необходимо найти термодинамические параметры состояния смеси (разд. 1.2.1), если смешивание происходило без изменения агрегатного состояния компонентов.

Можно, например, с большой точностью подсчитать температуру смеси по аддитивному соотношению $t = \sum_{i=1}^N m_i t_i / M$, где m_i , t_i – массы и температуры компонентов, M – масса смеси,

если при нормальном давлении смешиваются некоторые количества дистиллированной деаэрированной воды, нагретые в пределах температур 5...80⁰С. По нему удастся также найти правильную температуру смеси метана, пропана и бутана, если заданные интервалы температур и давлений соответствуют одинаковым состояниям этих компонентов и далеки от фазовых переходов. Однако это соотношение очевидно неприменимо для подсчета температуры смесей веществ, находящихся в разных агрегатных состояниях, например, водяного пара, воды и льда, или сильно различающихся по физико-химическим свойствам, например, кислот и оснований, и т.д. Для смеси близких по свойствам веществ в пределах одного агрегатного состояния могут быть надежно определены только экстенсивные свойства, например, плотность, теплоемкость.

В процессах термоокисления правило аддитивности может применяться для вычисления лишь некоторых параметров. Так, при расчетах одной из трех важнейших характеристик, определяющих полноту сгорания горючих веществ – коэффициента избытка выбросов α , можно использовать найденное по правилу аддитивности значение теоретически необходимого количества выбросов V_t , по возможности сопоставляя со сходными эмпирическими данными. Осторожность диктуется тем, что в процессе окисления молекул горючих веществ межатомные связи многократно трансформируются, а также образуются промежуточные соединения, значения V_t которых могут существенно отличаться от исходных. Это может сказаться и на итоговой величине V_t , т.к. в реакционной зоне при радикально-цепном механизме реакций одновременно находятся и конечные, и промежуточные продукты процессов термоокисления. Результаты аналогичных расчетов другой определяющей характеристики термообезвреживания – температуры зоны горения, можно использовать только в качестве ориентировочной информации. Этот параметр с трудом поддается и опытному уточнению, так как методы замеров температуры в зоне, где идут цепные реакции термоокисления, сопряжены со значительной погрешностью. Поэтому имеющаяся в литературе эмпирическая информация также может оказаться недостаточно надежной. Третий важнейший показатель полноты термоокисления – необходимое время пребывания токсичных соединений в зоне высоких температур τ_{sj} , складывается из продолжительности элементарных стадий окисления. Их набор неустойчив к изменению окружающих условий, в том числе к составу окисляемых веществ. В ходе технологического процесса состав загрязнителей всегда претерпевает значительные изменения. Как правило, концентрации компонентов многих производственных выбросов в течение технологического цикла изменяются от нуля до своих максимально возможных

значений, и поэтому величину τ_{sj} для реальных условий надежно рассчитать не удастся. Горючие компоненты большинства отбросных газов бывают представлены веществами, относящимися к разным группам химических соединений, ввиду чего при конструировании установок термообезвреживания невозможно обойтись без экспериментального уточнения расчетных данных.

Особенности балансовых расчетов сжигания топлива с отработанным воздухом

Иногда отбросные газы, загрязненные горючими компонентами, могут подходить по составу для использования в качестве воздуха для горения топлива. Тогда к расчетам сжигания топлива и термообработки выбросов предъявляют дополнительные требования. Кислород, содержащийся в отбросных газах, должен точно соответствовать его потребности в полном окислении (до конечных продуктов реакции – CO_2 и H_2O) как горючих компонентов выбросов, так и топливного газа. Нехватка кислорода в зоне горения из-за занижения коэффициента избытка выбросов – непосредственная причина неполного окисления горючих компонентов, т.е. образования химического недожога в виде промежуточных продуктов реакции окисления. Последствие наличия излишнего кислорода – падение температурного уровня зоны горения, что в итоге также приведет к химическому недожогу.

Погрешности, которые могут стать причиной неполного окисления горючих компонентов (химического недожога), при разработке и проектировании установок санитарной очистки газовых выбросов недопустимы: промежуточные продукты окисления горючих загрязнителей могут оказаться намного токсичнее соединений, поступающих на термообезвреживание. Поэтому в расчетах должны использоваться методы с минимальными погрешностями. Ошибку определения величины избытка воздуха, допущенную на стадии конструирования, устранять после сооружения установки весьма проблематично. Если образовался дефицит кислорода, то компенсировать его дополнительной подачей чистого воздуха в системах обезвреживания, использующих выбросы в качестве воздуха для горения, нецелесообразно, а добавлением отработанного - невозможно. С добавлением отбросного воздуха в реакционной зоне появится дополнительное количество горючих загрязнителей, для окисления которых потребуется еще некоторое количество воздуха, также содержащего компоненты, подлежащие окислению, и т.д.

Таким образом, для правильной работы рассматриваемой схемы обезвреживания уже на стадии ее проектирования необходима максимально точная увязка расхода отбросных газов (источника окислителя) с расходом топлива, используемого для подогрева горючих

компонентов до температуры самовоспламенения. Методом подбора можно получить приближенное решение, но его достоверность с учетом предыдущих приближений и допущений по-видимому, не будет высокой. Поэтому желательно (а при повышенных концентрациях загрязнителей – необходимо) основываться на методах, предусматривающих точное соответствие (самосогласованность) параметров отбросных газов и топлива, поступающих в установку на термообезвреживание.

Уточняющие коэффициенты избытка воздуха

Согласно исследованиям, горючие компоненты с концентрациями в отбросных газах менее $50 \cdot 10^{-6}$ кг/м³ (50 мг/м³) практически не оказывают влияния на характеристики работы топливоиспользующих установок. Расчетные поправки также невелики и соизмеримы по порядку величины с погрешностью аддитивных вычислений. Следовательно, можно для подсчета характеристик термообработки принимать во внимание только горючие топливные компоненты. Коэффициент избытка выбросов по топливному газу можно найти из соотношения:

$$\alpha = W_a / (W_f V_{tf}), \quad (2.176)$$

где W_a – расход отбросных газов, м³/ч (м³/с); W_f – расход топливного газа, м³/ч (м³/с); V_{tf} – теоретически необходимое количество воздуха, вычисленное по теоретической потребности компонентов топливного газа, м³/м³.

Если концентрации загрязнителей, подвергаемых термообезвреживанию, находятся в пределах $(50 \dots 100) \cdot 10^{-6}$ кг/м³, желательно использовать в расчетах уточняющие коэффициенты избытка выбросов ([194]). Для горючих загрязнителей, представленных легкими газообразными соединениями, достаточно ввести поправку на их физический объем

$$\beta = W_a \left(1 - \sum_{i=1}^N r_i \right) / (W_f V_{tf}) \quad (2.177)$$

где r_i – объемная доля i -го компонента - загрязнителя отбросных газов, м³/м³.

Коэффициент β не учитывает потребности загрязнителей в кислороде. Для отбросных газов с диспергированными загрязнителями, подлежащими термообработке (например,

органические смолы, полициклические углеводороды), в тех же пределах концентраций может оказаться существенной поправка не на объем, а на потребность в кислороде

$$\beta_{S(L)} = W_a \left(1 - \sum_{i=1}^N g_i V_{t_i(g)} \right) / (W_f V_{tf}) \quad (2.178)$$

где g_i – массовая доля i -го компонента – загрязнителя отбросных газов, кг/м³; $V_{t_i(g)}$ – теоретически необходимое количество выбросов для сжигания единицы массы i -го компонента, м³/кг.

Поправка на потребление кислорода (выбросов) может быть значительной и при термоокислении паров тяжелых углеводородов. Для них коэффициент избытка выбросов можно уточнить аналогично:

$$\beta_G = W_a \left(1 - \sum_{i=1}^N r_i V_{t_i(v)} \right) / (W_f V_{tf}), \quad (2.179)$$

где $V_{t_i(v)}$ – теоретически необходимое количество выбросов для сжигания единицы объема i -го компонента, м³/м³.

При обработке отбросных газов с концентрациями гомогенных загрязнителей в диапазоне $(150...250) \cdot 10^{-6}$ кг/м³ необходимы поправки и на физический объем загрязнителей, и на их потребность в кислороде:

$$\gamma = W_a \left(1 - \sum_{i=1}^N r_i - \sum_{i=1}^N r_i V_{t_i(v)} \right) / (W_f V_{tf}) \quad (2.180)$$

При содержании горючих компонентов в выбросах до $250 \cdot 10^{-6}$ кг/м³ уточненные коэффициенты избытка выбросов β , γ по формулам (2.177, 2.178, 2.179, 2.180) могут отличаться от коэффициента α по (2.176) на несколько (до десяти) процентов.

Самосогласованные параметры сжигания топлива и загрязнителей

Когда используемый для сжигания стандартного топлива отбросный воздух загрязнен горючими соединениями более чем на $250...300$ мг/м³, характеристики совместного горения загрязнителей с топливом заметно отличаются от характеристик сжигания топлива с чистым

воздухом. Поэтому нельзя обойтись без точного учета расхода кислорода и других параметров окисления примесей отбросного выбросов и компонентов топлива.

Чтобы результаты вычислений в последующем оправдывались, необходимо, как уже отмечалось, насколько можно избегать упрощений при постановке задачи и в расчетах. Самосогласование параметров совместного сжигания топлива и горючих компонентов отбросного выбросов автоматически снимает ряд исходных неточностей по увязке соотношения отбросного выбросов и топлива. Это позволяет обеспечить подачу выбросов в точном соответствии с потребностью в кислороде как топлива, так и горючих ингредиентов газовых выбросов.

По самосогласованному коэффициенту избытка выбросов A определяется соотношение расходов газовых выбросов и топлива. Он может быть найден из стехиометрического уравнения и материального баланса горения. На основе выражений (2.177, 2.178, 2.179, 2.180) получим:

$$A = \beta / (\beta - \gamma + 1) \quad (2.181)$$

При содержании горючих компонентов более $(200 \dots 250) \cdot 10^{-6}$ кг/м³ самосогласованный коэффициент избытка выбросов A может отличаться от коэффициента α по уравнению (2.176) на (10...20)% и более.

Соответствующее количество выбросов V_t , теоретически необходимое для сжигания топлива и горючих загрязнителей, определится как

$$V_t = (\beta - \gamma + 1) / (\alpha - \beta + 1/V_{tf}) \quad (2.182)$$

Соотношения для вычисления других самосогласованных параметров совместного сжигания топлива и загрязнителей отбросного выбросов приведены в прил. 3 и [58].

Конструкции газогорелочных устройств для установок термообработки выбросов

К газогорелочным устройствам установок обезвреживания токсичных выбросов, кроме общих требований обеспечения необходимой теплопроизводительности, безопасности, надежности, предъявляются дополнительные требования с целью удовлетворения специфичности условий работы. Это полное сжигание топлива в широком диапазоне избытков воздуха с минимальным выбросом вредностей в продуктах сгорания, а также ряд других, сущность которых соответствует свойствам сжигаемых веществ и специфике – источника выбросов. Поэтому в каждом конкретном случае приходится вносить изменения в конструкции серийно выпускаемых горелок. Горелки, работающие чисто по диффузионному типу, подобные

[195, 196], используют только в специальных случаях. Так например, авторы [197] рекомендуют их к применению для обезвреживания выбросов, представляющих смесь горючих загрязнителей с существенно различающимися скоростями горения – CO, H₂, CH₄. При обезвреживании вентиляционных выбросов с незначительным содержанием горючих компонентов наиболее удобным решением является использование выбросов в качестве воздуха для горения. Подачу отбросных газов осуществляют различными дутьевыми устройствами ([198, 199, 200, 201, 202, 203, 204]).

При сжигании газообразного топлива в дутьевых газогорелочных устройствах потоки газа и окислителя выдаются в зону горения отдельно. С целью ускорения процессов их смешения используются различные типы завихрителей воздуха и способы выдачи газового потока, рассмотренные выше. Однако перемешивания только за счет турбулентной диффузии недостаточно, т.к. для достижения полного сгорания топлива к каждой молекуле органического вещества должно быть подведено соответствующее стехиометрическому соотношению количество молекул кислорода. Наиболее длительная стадия процесса смесеобразования – молекулярная диффузия, проходит параллельно с химическими реакциями окисления. Поскольку время, необходимое для завершения процесса молекулярной диффузии, на несколько порядков больше времени протекания реакции между активными частицами топлива и окислителя, в таком пламени всегда существуют зоны с недостатком тех или иных компонентов или окислителя. В зонах с недостатком окислителя реакции могут идти в направлениях, ведущих к неполному сгоранию топлива. При сжигании традиционного газообразного топлива, основными компонентами которого являются предельные углеводороды, механизм реакций, происходящих в зонах с недостатком окислителя, в общих чертах известен. Сначала происходит термическая деструкция и дегидратация молекул с образованием радикалов типа CH₂. На следующем этапе радикалы объединяются первоначально в линейные, а затем в циклические и полициклические структуры, которые, в определенных условиях, могут конденсироваться. Если такие частицы успевают выйти из зоны высоких температур без взаимодействия с окислителем, то они образуют стабильные вещества, составляющие химический недожог. Если же они попадают в зону с избыточным кислородом, то, как правило, происходит быстрое окисление до CO₂ и H₂O, поскольку в зоне высоких температур эти частицы существуют в виде радикалов. Таким образом, при сжигании традиционного топлива в дутьевых горелках можно создать условия для обеспечения полного окисления его компонентов. Обезвреживание газовых выбросов сопровождается несколько другими условиями. Качественный состав отбросных газов и количественное содержание горючих компонентов в них, как правило, не стабильно. В зависимости от стадии

технологического процесса в отбросных газах могут появляться различные группы соединений – от алифатических до полициклических. Задача обеспечения требуемого количества окислителя для таких газов может быть решена только приближенно. К этому необходимо добавить, что процессы термической деструкции и дальнейшие направления реакций в пламени при недостатке кислорода известны практически только для метана, то предсказать конечный результат такого обезвреживания принципиально сложно.

Инжекционные горелки среднего давления выдают в пламенную зону полностью подготовленную газоздушную смесь. В пламени таких горелок практически отсутствуют зоны с недостатком кислорода, в которых могут происходить пиролитические процессы. Однако этот класс горелок не может быть применен для обезвреживания отбросных газов по следующим причинам. Отбор отбросных газов из промышленных установок выполняется тягодутьевыми аппаратами – вентиляторами, воздуходувками, вакуум-насосами. На выхлопе после этих аппаратов отбросные газы имеют определенное избыточное давление, что создает нерасчетные условия для работы инжекционных горелок и влечет за собой ухудшение смесеобразования. Кроме того, инжекционные горелки не могут стабильно работать при переменных и больших избытках выбросов. Последний фактор особенно важен для термообезвреживания отбросных газов, т.к. ввиду непостоянства их состава приходится подавать завышенные количества окислителя. На основании проведенного анализа выявлены преимущества и недостатки горелочных устройств, удовлетворяющих требованиям термообработки выбросов и предложены соответствующие конструкции ([205, 206, 207]). Вопросы их разработки и использования в промышленности рассмотрены в последующих разделах.

2.5.5 Комплексная обработка выбросов помещений КРУЭ с галогенсодержащими веществами

Источниками некоторых выбросов глобального действия с загрязнителями, включенными в список ООН от 1986г. как влияющие на озоновый слой, а также в список парниковых газов, служат производственные процессы с использованием галогенсодержащих веществ. Одно из них – гексафторид серы, может содержаться в составе штатных вентиляционных и аварийных выбросов помещений, в которых размещены КРУЭ. В данной работе исследуется возможность комплексной сорбционной, термической и конденсационной обработки таких выбросов с целью нахождения параметров, обеспечивающих их максимальное обезвреживание.

Для технологических процессов, связанных с применением хлорсодержащих растворителей, например, для процессов нанесения различных слоев на синтетические пленочные основы, характерно, что их энергоемкость сопоставима с потерей тепловых ресурсов, содержащихся в выбросах. Концентрация хлорсодержащих веществ в отработанном воздухе после рекуперации может составлять 0,3-0,8 г/м³, а теплота сгорания таких широко распространенных растворителей, как метилхлорид и дихлорэтан, достаточно высока – 7100 и 11500 кДж/кг соответственно. Расчеты показывают, что потери с теплотой сгорания хлорсодержащих компонентов в выбросах интенсивностью 1700 м³/ч составляют 5,1·10³ МДж/год. В то же время потребление всех видов энергоресурсов (пара, тепловой и электроэнергии) для всех процессов, начиная с подготовки сырья и кончая сушкой пленки, составляет 4,8·10³ МДж/год. Аналогичные примеры можно привести и для ряда других технологических процессов, использующих органические растворители. И все же основным при решении вопроса о необходимости затрат на очистку выбросов следует считать то, что концентрации токсичных компонентов обычно на 3 и более порядка превышают ПДК и оказывают негативное глобальное воздействие на окружающую среду.

Для обезвреживания выбросов, содержащих хлорсодержащие вещества, в настоящее время применяются методы конденсации, сорбции, каталитического сжигания и непосредственно огневого обезвреживания. Методы конденсации и сорбции неприемлемы при концентрации хлорорганики в выбросах менее 1...2 г/м³. Метод каталитического сжигания сопряжен со сложностями подбора стойких и экономически приемлемых катализаторов. Наиболее надежным и универсальным методом обезвреживания хлорсодержащих соединений в мировой практике считается метод непосредственного сжигания.

Однако термическим методом можно надежно обезвреживать выбросы, содержащих чисто органические соединения, которые могут окислиться до диоксида углерода и водяных паров. При изучении закономерностей термического обезвреживания газовых выбросов, содержащих различные классы органических соединений – предельных и непредельных альдегидов, фенолов, ароматических кислот, было установлено, что основными параметрами эффективности термоокисления являются уровень температуры и время пребывания рассматриваемого компонента в зоне высоких температур [208]. Получена достаточно четкая корреляция конечной концентрации компонентов по этим параметрам. Если значение какого-либо из параметров обезвреживания недостаточно, наблюдается зависимость конечных концентраций обезвреживаемых компонентов от начальных. Это указывает на частичное разложение, а не обезвреживание поступающих на обработку компонентов. Результатом работы

установки термообезвреживания в таком режиме может быть выброс в атмосферу соединений более токсичных, чем поступивших на обезвреживание.

В целом же термообработка при условии обеспечения надлежащих параметров (которые возможно определить опытным путем для каждого ингредиента) является радикальным методом для обезвреживания органических загрязнителей. Непосредственное же сжигание выбросов с галогенорганическими компонентами принципиально недопустимо. В настоящее время не существует оптимальных методов обезвреживания выбросов с такими загрязнителями при концентрации компонентов менее 1 г/м^3 . Наиболее надежным, хотя и не окончательным (возникает необходимость удаления, как минимум, хлористого водорода) из продуктов сгорания, в этом случае также считается термообезвреживание.

Традиционные способы термообезвреживания выбросов с хлорсодержащими компонентами заключаются в их подаче в пламенную зону печей различных конструкций и последующей нейтрализации продуктов сгорания. При этом приходится преодолевать значительные технические трудности вследствие высокой коррозионной активности дымовых газов и др. причин. Велика также вероятность попадания в атмосферу высокотоксичных соединений хлора, синтезированных в пламени и не сконденсировавшихся при промывке вместе с хлоридом водорода. Ряд таких соединений обладает парниковым эффектом. При этом необходимо учитывать, что в пламени может всегда происходить синтез ряда новых высокотоксичных соединений, таких как фосген и более токсичных, которые также необходимо улавливать и удалять из конечных продуктов обезвреживания. Подобные системы обезвреживания сами становятся источниками новых соединений, которые могут быть более токсичны по сравнению с поступающими на обезвреживание, и иметь более сильный эффект парникового воздействия на окружающую среду. Обычно же в узлах доочистки таких систем производят улавливание или нейтрализацию хлорида водорода, и лишь по нему определяют активность очистки. Положение усугубляется тем, что в реальных технологических и вентиляционных выбросах концентрации токсичных компонентов непостоянны. Это лишает возможности подбора стехиометрического количества присадок, в результате чего происходит неполная нейтрализация HCl или попадание излишнего количества присадок в атмосферу и сточные воды. Задача гарантированного термообезвреживания галогенсодержащих компонентов может быть решена радикально только при условии предотвращения попадания их в зону, где идут реакции горения. С этой целью разработана система комбинированного обезвреживания с удалением хлора из выбросов до пламенной зоны [209, 210], в которой осуществляется предварительное разложение хлорсодержащих растворителей с последующим удалением связанного хлора.

3 Верификация результатов теоретических исследований по очистной обработке производственных выбросов ТЭС. Сравнение с данными численных исследований

3.1 Расчеты движения гомогенных и гетерогенных потоков дымовых газов и производственных выбросов ТЭС на основе комплексов CFD

3.1.1 Выбор математической модели численных расчетов гомогенного потока выбросов

С целью обоснованного выбора расчетной модели проведем краткий анализ математических моделей, используемых для численных расчетов, в т.ч. программах CFD, и оценим возможность их применения для решения поставленных задач.

Рассмотренная в разд. 2.2 модель осреднения пульсаций с использованием пути перемешивания (модель Прандтля) хорошо воспроизводит тонкие вязкие слои и многие простые течения [211]. Она наглядна, проста и получила очень широкое распространение. В настоящее время она используется в оценочных расчетах. При этом за l'_m принимают геометрическую характеристику потока, соответствующую среднему размеру пульсирующих масс вещества (молей) и называемую масштабом турбулентности. Прием усреднения по времени характеристик пульсаций позволяет использовать аппарат теории подобия - такие величины уже можно определять измерительными приборами, т.е. опытным путем. Измерительное устройство не может отражать бесчисленное множество мгновенных изменений измеряемой величины, а показывает одно значение за определенный промежуток времени, длительность которого зависит от инерционности прибора. Будет ли показываемое значение близким к среднему за этот промежуток времени, зависит от специфики измеряемой величины и измерительного прибора. Вместе с тем модель Прандтля имеет некоторые недостатки. Турбулентность рассматривается в таком состоянии, когда в каждой отдельно взятой точке, области потока соблюдается равновесие в виде баланса генерации и диссипации турбулентной энергии, не зависящее от переноса турбулентности из других точек, областей, и от предыстории процесса. Модель непригодна, например, если турбулентность возникает из-за внешних (или граничных) причин, таких как изменение конфигурации ограничивающих поверхностей или появление препятствий в потоке. По окончании следа за препятствием турбулентные пульсации не исчезают и переносятся далее потоком, осредненная скорость и направление которого постоянны. Однако из (2.35) следует, что интенсивность турбулентного переноса будет нулевой, если градиент скорости равен нулю. Следовательно, градиент осредненной скорости в этом случае оказывается равным нулю, и выражение (2.35) покажет отсутствие турбулентности. С целью устранения недостатков, возникающих при осреднении пульсаций с использованием пути смешения (масштаба турбулентности), стали составляться более сложные модели

турбулентности, в которых также предусматривалось описывать пульсационный перенос (пульсации) в потоке дополнительными дифференциальными уравнениями, однако более сложными способами и менее однозначно, чем по модели Прандтля.

Первым шагом в этом направлении был переход от назначения непосредственной зависимости между градиентом скорости и турбулентной вязкостью (2.35) к ее нахождению из уравнений Навье – Стокса для пульсационного переноса. При этом физически приемлемым масштабом пульсаций скорости, который соответствовал характеристикам, входящим в уравнения Навье – Стокса, оказался параметр \sqrt{k} ([211, 212, 213, 214]). Он отражает динамику т. наз. вторых моментов, или турбулентных (рейнольдсовых) напряжений, т.е. осредненных произведений проекций пульсаций. Величина k называется кинетической энергией турбулентности и определяется как

$$k = \left[(u'_x)_m + (u'_y)_m + (u'_z)_m \right] / 2, \quad (3.1)$$

где $(u'_x)_m$, $(u'_y)_m$, $(u'_z)_m$ – усредненные проекции пульсаций скорости.

Используя этот масштаб в представлении, что N пропорционален масштабам скорости и турбулентности, можно получить выражение Колмогорова-Прандтля

$$N = C_1 l \sqrt{k}, \quad (3.2)$$

где C_1 – эмпирическая константа; l – линейный масштаб турбулентности.

Модель турбулентности, представленная в такой форме, называется однопараметрической k - моделью. Более сложные, и, как считается, более точные формы уравнения энергии турбулентных пульсаций (k - уравнения) получают путем преобразования уравнений Навье-Стокса. Однако в них также присутствуют эмпирические константы и линейный масштаб l , определяемый по опытным соотношениям.

Однопараметрическая k - модель позволяет преодолеть некоторые ограничения модели пути смешения, но имеет свои недостатки. Турбулентная вязкость (диффузия пульсаций) предполагается в ней изотропной, что не всегда подходит для реальных течений, например, с архимедовыми силами. Область применения k - модели ограничивается не слишком сложными течениями, по крайней мере, такими, для которых возможен подбор необходимых эмпирических констант.

Иногда удается улучшить результаты расчетов, если использовать не одно, а два, три и более дополнительных дифференциальных уравнений. Подобные модели называют двухпараметрическими, трехпараметрическими и т.д. Среди них наиболее употребительны двухпараметрические, в качестве параметров которых используется, кроме перечисленных

выше турбулентной вязкости N , энергии турбулентного переноса k , масштаба турбулентности l , еще диссипация турбулентной энергии ε . В зависимости от этого различают $(k-l)$ - , $(N-l)$ - , $(k-\varepsilon)$ - модели. Одной из наиболее распространенных и надежных вследствие широкой опытной проработки на настоящее время представляется $(k-\varepsilon)$ - модель. В дальнейшем будут рассмотрены результаты численных исследований, реализованных в рамках коммерческих пакетов *Phoenix* и *Fluent*, также с использованием этой модели. В ней уравнения турбулентных пульсаций (полученные из уравнений Навье-Стокса) содержат диффузионную и диссипативную составляющие энергии пульсационного переноса.

Соотношения для энергии переноса пульсаций (для энергии турбулентной диффузии) могут быть представлены, например, в виде:

$$\left[u'_x \frac{(u'_y)^2}{2} + \frac{P}{\rho} \right]_m = \frac{N}{C_2} \frac{\partial k}{\partial x}; \quad (3.3)$$

$$\left[u'_y \frac{(u'_z)^2}{2} + \frac{P}{\rho} \right]_m = \frac{N}{C_2} \frac{\partial k}{\partial y}; \quad (3.4)$$

$$\left[u'_z \frac{(u'_x)^2}{2} + \frac{P}{\rho} \right]_m = \frac{N}{C_2} \frac{\partial k}{\partial z}, \quad (3.5)$$

а для диссипации энергии ε (при больших Re)

$$\varepsilon = C_3 l k^{3/2}, \quad (3.6)$$

где P , ρ – давление и плотность; C_2 , C_3 – эмпирические константы.

Соотношения (3.3, 3.4, 3.5) построены на допущении о градиентности переноса пульсаций, а в выражении (3.6) использовано предположение А.Н. Колмогорова о том, что между величинами генерации турбулентности и диссипации турбулентной энергии в потоке существует корреляция.

С учетом (3.3, 3.4, 3.5, 3.6) k - уравнение (уравнение энергии, уравнение генерации турбулентных пульсаций) и ε - уравнение (уравнение диссипации турбулентной энергии), записанные для координаты \mathbf{x} , могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial k_x}{\partial \tau} + u_{mx} \frac{\partial k_x}{\partial x} + u_{my} \frac{\partial k_x}{\partial y} + u_{mz} \frac{\partial k_x}{\partial z} \right)_m &= \frac{N}{C_2} \left(\frac{\partial^2 k_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 k_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 k_x}{\partial z^2} \right) + \\ + N \frac{\partial u_{mx}}{\partial y} \left(\frac{\partial u_{mx}}{\partial y} + \frac{\partial u_{my}}{\partial x} \right) &- C_3 l k^{3/2}; \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\left(\frac{\partial \varepsilon_x}{\partial \tau} + u_{mx} \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial x} + u_{my} \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial y} + u_{mz} \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial z} \right)_m = \frac{N}{C_2} \left(\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} \right) + C_5 U \frac{\varepsilon_x}{k_x} (1 - C_6 Ri) - C_7 \frac{\varepsilon_x^2}{k_x}, \quad (3.8)$$

где Ri – число Ричардсона; C_4, C_5, C_6, C_7 – эмпирические константы; U – генерация пульсаций вследствие взаимодействия вторых моментов с градиентами средней скорости, определяемая из выражения

$$U = \left(u'_x u'_y \right)_m \partial u_{mx} / \partial y. \quad (3.9)$$

Следует отметить, что рассмотренные здесь k - и ε - уравнения, равно как и другие используемые в настоящее время математические модели, не являются теоретическим решением проблемы возникновения (генерации) турбулентных пульсаций и их исчезновения (диссипации турбулентной энергии). По Рейнольдсу, при внесении некоторых видов возмущений энергия из «главного» (происходящего в ламинарном режиме) движения переходит в возмущающее движение, но при этом одновременно происходит и определенное затухание вследствие увеличения действия вязкости по сравнению с ламинарным режимом. Проблеме закономерностей возникновения и развития турбулентности посвящено огромное число исследований (отметим здесь только [215, 216, 217, 218]). Однако теоретически обосновать развитие возмущающего движения можно только для значительно упрощенных случаев, как например, для случая обтекания потоком пластинки (Толмиен, [219]).

В отмеченных выше моделях взаимосвязь между процессами возникновения и диссипации вихрей устанавливается эмпирически. В $(k-\varepsilon)$ - модели предположение А.Н. Колмогорова о корреляции между генерацией и диссипацией турбулентности, по сути совпадающее с рейнольдсовским переходом ламинарного движения в возмущающее и затуханием возмущений, реализуется через эмпирическое выражение (3.6). Поэтому область его применения, и, в конечном счете, область применения $(k-\varepsilon)$ - модели, ограничиваются условиями опытов, в которых получены эмпирические константа C_3 и показатель степени k , равный 1,5. Чтобы расширить область применения $(k-\varepsilon)$ - модели в условиях действия архимедовых сил или/и при наличии ограничивающих поверхностей в уравнения (3.7, 3.8) вводятся соотношения, учитывающие ускорение силы тяжести и константы, характеризующие параметры ограничивающих стенок.

3.1.2 Выбор математической модели численных расчетов гетерогенного потока выбросов

Анализ теоретической основы моделирования турбулентных гетерогенных потоков (разд. 2.3.1) показал, что пока она не может обеспечить точности предсказания модификаций турбулентности в зависимости от характеристик дисперсной фазы. С этой позиции более привлекательным считается натурный эксперимент. Однако в экспериментальных работах также в основном рассматривается транспорт потоком упрощенных систем, чаще всего из монодисперсных сферических элементов. Вследствие этого их обобщающие результаты, представляемые в виде безразмерных симплексов и комплексов, также нуждаются в дальнейшей эмпирической тарировке.

Представленный в работах [220, 221] анализ экспериментальных исследований по учету влияния параметров взвеси на характеристики турбулентного потока показывает, что имеющиеся безразмерные параметры недостаточно корректно отражают усиление или ослабление турбулентности из-за содержания взвеси в потоке. Согласно с [221], безразмерные одиночные параметры и симплексы, предложенные различными исследователями, малоэффективны как критерии классификации изменения мультифазных потоков. По [220], в разбавленной суспензии могут действовать механизмы гашения турбулентности (рост инерции и повышение эффективной вязкости потока из-за присутствия частиц, увеличение диссипации в результате их сопротивления) и ее усиления (повышение скорости колебания из-за наложения гидродинамических следов частиц, а также самопроизвольное индуцирование вихрей и неустойчивости течения, вызываемое подъемными силами, возникающими из-за локальных изменений плотности от сгущения и рассредоточения частиц). Линейные масштабы, в пределах которых становятся активными те или иные механизмы, не остаются постоянными. Так, по сравнению с порожними потоками, взвешенные частицы могут одновременно усиливать турбулентность на одном и подавлять на другом диапазоне масштабов, и общая модуляция будет зависима от относительной силы различных механизмов. Среди них основными, по-видимому, являются увеличение диссипации из-за сопротивления частиц и индуцирование вихрей из-за появления гидродинамического следа за частицами в потоке. Крупные частицы увеличивают турбулентность путем создания нестационарных следов с числом Re выше критического. Его значение для возникновения вихрей несколько уменьшается в окружении турбулентности ([222] и др.). Турбулентная кинетическая энергия увеличивается в области следа более чем на порядок отчасти из-за неустойчивости, возникающей от окружающей турбулентности, но в основном из-за сброса вихрей. Даже при отсутствии неустойчивости, суперпозиции множества ламинарно-подобных следов частиц, случайно расположенных в

пространстве и времени, способствуют возникновению колебаний ([223]). Эффект суперпозиции следов отмечают и в потоках аэрозолей с низким фракционным объемом Φ_v , занимаемым дисперсной фазой из мелких частиц. Эксперименты авторов работы ([224]) показали увеличение при этом эффекта высоких волновых чисел в энергетических спектрах. Большинство исследователей отмечает и явление затухания турбулентности. Считается, что за дополнительную диссипацию ответственны частицы, силы которых приложены к потоку так, что противодействуют турбулентным флуктуациям.

Авторами [221] предлагаются критерии, полученные путем представления и анализа уравнения Навье – Стокса как уравнения, описывающего совместное движение взвешенных частиц и потока. Посредством приведения его к безразмерному виду и методом анализа размерностей ими получен параметр, модернизирующий число Стокса. Он позволяет находить области (сочетания) параметров потока и частиц, где происходит гашение и усиление турбулентности. Уравнение движения потока жидкости, содержащей дисперсные включения, конструируется как уравнение Навье – Стокса для отдельно взятого бесконечно малого объема:

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \cdot \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \cdot \partial x_j} - \frac{1}{\rho_f} \cdot f_i, \quad (3.10)$$

где U_i – скорость жидкости; P – давление; ρ_f ν – плотность и кинематическая вязкость жидкости; f_i – общая сила действия жидкости в i -ом направлении на поверхности частиц, оказавшихся внутри выделенного бесконечно малого объема ΔV_{cell} , определяемая как сумма поверхностных сил по этим частицам:

$$f_i = \lim_{\Delta V_{cell} \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V_{cell}} \int S(\vec{e}_i, \vec{n}_s) dS, \quad (3.11)$$

где единичные векторы e_i и n_s ориентированы в i -ом и нормальном направлениях.

Вводя еще ряд допущений, авторы работы [221] получают безразмерные параметры, подходящие для классификации изменения турбулентности мультифазных потоков. С использованием характерного масштаба длины и скорости крупномасштабной турбулентности для получения силовой обратной связи, уравнение (3.10) записывается в безразмерном виде. Оно содержит безразмерный инерционный параметр частиц – число Pa_{Re} :

$$Pa_{Re} = \left[\left(Re_L^2 / Re_p \right) (\rho_p / \rho_f) (d_p / L)^3 \right] / 18, \quad (3.12)$$

где ρ_f - плотность жидкости, ρ_p , d_p – плотность и диаметр частицы, Re_L – число Рейнольдса, определяемое по характерному масштабу длины и скорости крупномасштабной турбулентности.

Авторами [221] обнаружена корреляция затухания или усиления турбулентности от параметров Re_L и Pa_{Re} . Можно интерпретировать их смысл как параметры, определяющие области характеристик частиц, с которыми они движутся несогласованно или согласованно по отношению к турбулентным вихрям. Каждый из них можно рассматривать как естественное унитарное образование с вращательным (обобщенно – криволинейным) движением потока. Как физическое явление такое движение потока в вихре можно с высокой степенью приближения считать подобным движению мультифазных потоков в вихревых аппаратах. В наших исследованиях, выполнявшихся одновременно с [221], решалась обратная задача – поиск универсальных параметров, определяющих характеристики движения взвешенных частиц во вращающихся дисперсных потоках. Получены сходные безразмерные параметры, лимитирующие условия движения и инерционной сепарации частиц с линией тока. Это согласуется с первой теоремой подобия: явления, подобные в каком-либо смысле (напр., полностью или частично, физически или математически), имеют одинаковые критерии подобия – безразмерные сочетания величин, получаемые методами теории подобия.

В работах [225, 226, 227] был представлен метод расчетного определения эффективности отделения взвеси для сепараторов, в которых винтовое движение потока возможно аппроксимировать как плоское вращение в поперечном сечении аппарата (рис. 3.1). Решение задачи основано на сопоставлении суммарных энергетических характеристик вращающегося потока и взвеси, представляющих в конечном итоге затраты энергии на совершение работы отделения взвеси в течение единичного промежутка времени, т.е. на совершение соответствующего действия. Эффективность отделения дисперсной части аэрозоля в рассматриваемом вихревом устройстве зависит от величины силы инерции частиц во вращающемся потоке. Она определяется размерами и массой частиц, а также кривизной траектории, т.е. в основном – энергией, затраченной на вращение мультифазного потока, и конструктивными характеристиками аппарата.

Универсальной характеристикой энергетического совершенства аппаратов с вращающимися потоками, связывающей конструктивные параметры устройства, характеристики потока и эффективность отделения взвешенных частиц от несущей среды, может служить градиент силы в радиальном направлении потока f_R , Н/м ([228]). Он входит в соотношения, определяющие радиальный градиент давления $\text{grad } p$ в форме, соответствующей модели вращения потока $uR^k = \text{const}$, примененной для исследуемого аппарата при

аппроксимации реального трехмерного винтового движения плоским вращением. В аппарате с тангенциальным вводом и кольцевым каналом без центрального стока (левая часть рис. 3.1а) движение потока близко к «потенциальному» вращению по кольцевым траекториям с показателем степени k от 0 до 1 (эпюры скорости 1, 2). В аппарате с завихрителем и центральным стоком (правая часть рис. 3.1а) вращение приближено к «квazitвердому» со значениями $k = -1$ (эпюра скорости 3).

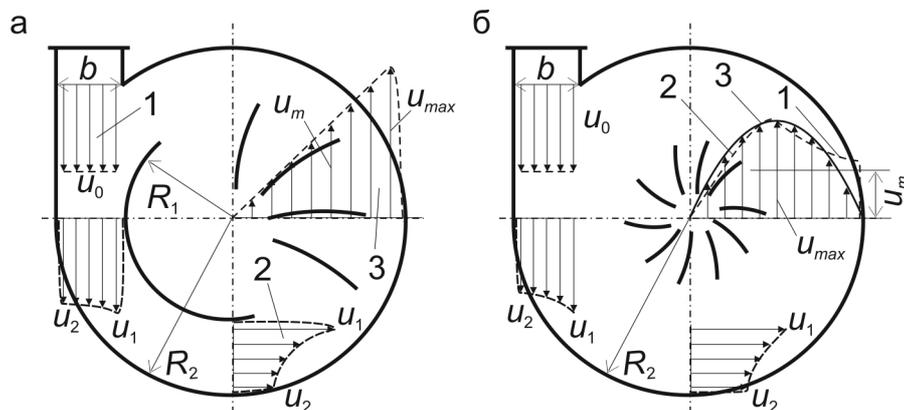


Рис. 3.1 Модели движения газового потока в аппаратах с тангенциальным вводом и завихрителем: b – ширина входного отверстия; R_1, R_2 – радиусы внутреннего ограждения кольцевого канала и корпуса аппарата; u_0 – скорость потока на входе в аппарат; u_1, u_2 – скорости на внутренней и внешней границах канала; u_{max}, u_m – максимальная и средняя тангенциальные скорости потока

Значение радиального градиента силы при «потенциальном» движении по кольцевому каналу без центрального стока с $k=0,5$:

$$f_R = \rho \frac{u_0^2}{4} (R_2^{0,5} + R_1^{0,5})^2 \text{ Па}\cdot\text{м}. \quad (3.13)$$

Для режимов работы аппаратов, в которых можно считать плотность ρ потока по сечению постоянной, f_R является константой. Начальный градиент силы f_R имеет строго определенную величину для каждого типоразмера аппарата, и является однозначной характеристикой как для потока, так и для аппарата. Поэтому на его основе можно получить обобщенный параметр энергетического совершенства завихрительных устройств. Математически строго такой параметр получен методами теории подобия, в частности, путем приведения к безразмерному виду системы уравнений, включающих уравнение движения потока и уравнение Ньютона для частицы ([225, 226]). В конечном виде данный комплекс включает диаметр D_p и плотность ρ_p частицы, динамический коэффициент вязкости μ , плотность ρ_f и радиус кривизны R_2 несущей среды. По своей структуре он сходен с числом Рейнольдса:

$$u_0 \rho_p^2 D_p^4 / C \rho_G R_2^3 \eta \equiv Re_r, \quad (3.14)$$

где C – коэффициент, зависящий от типа завихрительного устройства аппарата.

Численные значения параметра Re_r должны коррелировать со степенью осаждения частиц из криволинейных потоков, т.к. Re_r представляет собой соотношение энергий и действий частицы и вращающегося потока. Поэтому он может быть применен для оценки эффективности широкого круга осадителей с вращающимся (вихревым) потоком.

Вместе с тем, очевидно, конкретные результаты расчетов зависят от типа сепаратора, на что указывает и коэффициент C в выражении (3.14). Это предопределяет необходимость тщательного подбора эмпирических сведений для аппроксимации вращения потока в аппарате.

3.1.3 Проверка корреляции значения Re_r со степенью осаждения частиц золы из потоков выбросов в аппаратах с завихрительными устройствами

Для проверки адекватности значения Re_r как показателя степени осаждения частиц в завихрительных устройствах и его адаптации как параметра параметра осаждения к вихревым мультифазным золоуловителям, используем результаты численных исследований $3d$ - модели на базе программного комплекса *Phoenix*, и натурных исследований вихревого пылеуловителя по работе [229]. Автором цитируемой работы для замыкания системы уравнений турбулентного движения в численных расчетах им была принята как наиболее надежная k - ϵ модель, поскольку ее эмпирические константы получены путем обработки больших массивов экспериментальных данных для различных условий ([230]), в т.ч. подходящих под его исследования. Аппарат представлял собой циклон с установленным по оси вихревым контактным устройством (ВКУ), подобным устройствам, представленным в работах [61, 231] для сорбционных и ректификационных процессов. Однако в численных исследованиях такое ВКУ не рассматривалось: толщина лопастей была значительно меньше приемлемого шага сетки, и программа их «не видела». Поэтому исследованный аппарат по сути конструкции был близок к обычному циклону, но вместо сплошной центральной трубы имел направляющие лопасти, частично перекрывающие сечение прохода потока в центральную часть пылеуловителя.

Чтобы использовать значение Re_r в расчетах пылеуловителя с ВКУ, необходимо установить тип математической модели вращательного движения дисперсного потока в нем. С этой целью далее будет использован алгоритм, обратный употребленному при получении выражения (1.44) распределения скорости потока в поперечном сечении кольцевого канала возвратно-поточного циклона [67]. За основу составления модели вращательного движения дисперсного потока в ВКУ принята графическая экспериментальная зависимость относительной тангенциальной скорости u/u_0 от относительного радиуса R/R_0 , полученная автором исследования [229].

Эта зависимость с удовлетворительной точностью была аппроксимирована параболой [232]

$$u/u_0 = -8 \left(\frac{R}{R_2} - 0,5 \right)^2 + 2. \quad (3.15)$$

Используем полученное выражение в уравнении постоянства расхода газа через пылеуловитель (условие его герметичности $W = \text{const}$):

$$\text{const} = u_0 b H = \frac{u b H}{2 \left[1 - 2^2 \left(\frac{R}{R_2} - 0,5 \right)^2 \right]} = \frac{u b H}{2 \left[\left(2 - \frac{2R}{R_2} \right) \frac{2R}{R_2} \right]} = \frac{u}{\frac{R}{R_2} \left(1 - \frac{R}{R_2} \right)} \cdot \frac{b H}{8} \quad (3.16)$$

Очевидно, что выделенный множитель $u \left[R(1 - R/R_2)/R_2 \right]^{-1} = \text{const}$. Он представляет собой константу типа $uR^k = \text{const}$, определяющую конкретную форму модели вращения потока в рассматриваемом аппарате с ВКУ. При нахождении расхода W интегрирования по местным скоростям с учетом их радиального распределения по этой модели, можно вынести полученную константу из-под знака интеграла:

$$W = \frac{u}{\frac{R}{R_2} \left(1 - \frac{R}{R_2} \right)} \cdot \frac{R_2 H}{8} \int_0^{R_2} \frac{R}{R_2} \left(1 - \frac{R}{R_2} \right) d(R/R_2). \quad (3.17)$$

Итак, вращение в рассматриваемом пылеуловителе с ВКУ удовлетворительно аппроксимируется моделью, близкой к «квazitвердому» вращению с $k = -1$, но относительно произведения $R(1 - R)$ (в силу того, что R_2 – постоянная величина):

$$\frac{u}{R(1 - R)} = \text{Const}. \quad (3.18)$$

Полученная математическая модель «квazitвердого» вращения касательно квадрата относительного радиуса поперечного сечения аппарата с ВКУ проанализирована на физическую непротиворечивость действию. По [233], в аппаратах такого типа движение потока по периферии близко к модели «потенциального» вращения (рис. 3.1б, кривая 1), а в

центральной части – к модели «квазитвердого» вращения (рис. 3.1б, кривая 2). В целом по поперечному сечению аппарата такое движение потока удовлетворительно охватывается моделью плоского вращения с k , близким к -2 (рис. 3.1б, кривая 3). Это хорошо согласуется с результатом, полученным в (3.18).

Рассматривая движение потока по зонам, можно еще представить тангенциальную скорость, соответствующую (3.18), как функцию двух переменных $u = (\check{R} = R/R_2; k)$. Тогда для значений $\check{R} = 0,2 \dots 0,4$, определяющих границы зоны размещения лопаток, $k = -1,14 \dots -1,56$, а при $\check{R} = 0,5$ $k = -2$. Следовательно, поток начинает перестраиваться перед входом в завихритель, и в этой зоне сечения аппарата модели «квазитвердого» вращения переходит от квадратичной к линейной зависимости тангенциальной скорости от радиуса. Это также вполне согласуется с данными работы [233]: величины k для центральной части профиля скорости (в переходной зоне от «потенциального» к линейному «квазитвердому» вращению) при типичных сочетаниях значений расхода и конструктивных параметров аппарата (его диаметра, размеров входного сечения $b \cdot H$, конструкции завихрителя) должны оказаться ниже, чем -1 . В связи с вышесказанным математическая модель (3.18) может быть признана физически не противоречащей закономерностям движения потока в аппарате с ВКУ и приемлемой для использования в дальнейших преобразованиях. Воспользуемся этой зависимостью для вывода выражения радиального градиента силы f_R . Выразим посредством нее u через u_0 и проинтегрируем (1.48) по радиусу аппарата с ВКУ:

$$\int_{p_1}^{p_2} dp \approx \int_0^{R_2} \rho_G \frac{u_0^2}{R} \left[8 \frac{R}{R_2} \left(1 - \frac{R}{R_2} \right) \right]^2 dR = \frac{1}{R_2} \int_0^{R_2} 64 \rho_G u_0^2 R_2 \left(1 - \frac{R}{R_2} \right)^2 \frac{R}{R_2} d \left(\frac{R}{R_2} \right). \quad (3.19)$$

Следовательно, радиальный градиент силы имеет вид:

$$f_R = 64 \rho_G u_0^2 R_2, \quad (3.20)$$

а значение

$$a_{BKV} = f_R / u_0 = 64 \rho_G u_0 R_2, \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad (3.21)$$

в этом случае представляет собой удельное действие, совершаемое над единицей объема (1м^3) потока выбросов, обрабатываемых в аппарате с ВКУ. Отнеся его к динамическому коэффициенту вязкости потока, получим число Рейнольдса для вращающегося потока, представляющее действие над потоком в аппарате с ВКУ:

$$\text{Re}_{BKV} = a_{BKV} / \eta = f_R / u_0 \eta = 64 \rho_G u_0 R_2 / \eta. \quad (3.22)$$

Число Re_r , выражающее соотношение действий частицы и потока, вновь получим как отношение квадрата инерционного числа Re_p^{in} частицы к числу $Re_{ВКУ}$ для сепаратора с ВКУ:

$$\left(Re_p^{in}\right)^2 / Re_{ВКУ} = 3\pi\eta(u_0\tau_w/R_2)^2 / 64\rho_G u_0 R_2 \cong \frac{u_0 \rho_p^2 D_p^4}{2200 \rho_G R_2^3 \eta} = \frac{1}{2200} Re_r. \quad (3.23)$$

Численное значение Re_r в окончательном виде – это энергетическая характеристика эффективности отделения взвешенной части мультифазного потока в данном вихревом аппарате. Отметим, что выражение (3.23) представляет собой безразмерный инерционный параметр частиц, принципиально сходный с числом Pa_{Re} , полученным в [221].

Число Re_r должно показывать возможность сепарации частицы из вращающегося потока с конкретными энергетическими характеристиками вследствие того, что ее энергии достаточно для продолжения инерционного движения в прежнем направлении. Это позволяет определить фракционную степень инерционной сепарации частиц из потока при существующих энергозатратах. Для верификации численных значений Re_r выполнены оценки степени осаждения частиц в рассматриваемом сепараторе с ВКУ по [229].

Диаметр корпуса сепаратора 460 мм. Для сравнения расчеты будем проводить при табличных значениях параметров выбросов: $\rho_p = 1930 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$; примем также плотность газовых выбросов $\rho_G = 1,293 \text{ кг/м}^3$, дисперсию взвешенных частиц $\sigma_p = 2,2$. Из опытных данных (рис. 4.2 в [229]) известно, что степень осаждения частиц диаметром $D_p \leq 40 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ свыше 99% при скорости потока на входе в сепаратор $\sim 15\text{-}20 \text{ м/с}$.

Результаты расчетов относительного числа Рейнольдса Re_r для размеров частиц $D_p = (5\dots 100) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ при скорости потока на входе в сепаратор $u_0 = 2,5\dots 30 \text{ м/с}$, $\rho_p = 1930 \text{ кг/м}^3$, $\rho_G = 1,293 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 2,22 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $R_2 = 0,2$, представленные на графиках рис. 3.2, рис. 3.3 и в таблице (таблица 3.1) показывают следующее.

Расчеты показывают, что при скорости потока на входе $15\dots 20 \text{ м/с}$ частицам диаметром $D_p = 40 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ соответствуют числа $Re_r = (6,23\dots 8,31) \cdot 10^{-4}$. Для сравнения на рис. 3.4 приведены результаты расчетов значений Re_r по частицам того же диапазона размеров в серийных циклонах ЦН-15 при входной скорости $u_0 = 2\dots 14 \text{ м/с}$. По паспортным данным циклонов оптимальная входная скорость $3,5 \text{ м/с}$, диаметр отсекаания $D_{50} = 4,5 \text{ мкм}$. Считая зависимость фракционных коэффициентов очистки от размеров частиц по логарифмически нормальному распределению, можно получить, что диаметр D_{99} частиц, осаждаемых в ЦН-15 на 99%, равен 70 мкм . Для $D = 70 \text{ мкм}$ значение $Re_r = 4,04 \cdot 10^{-4}$, что близко к значениям Re_r , полученным для такой же степени осаждения в ВКУ.

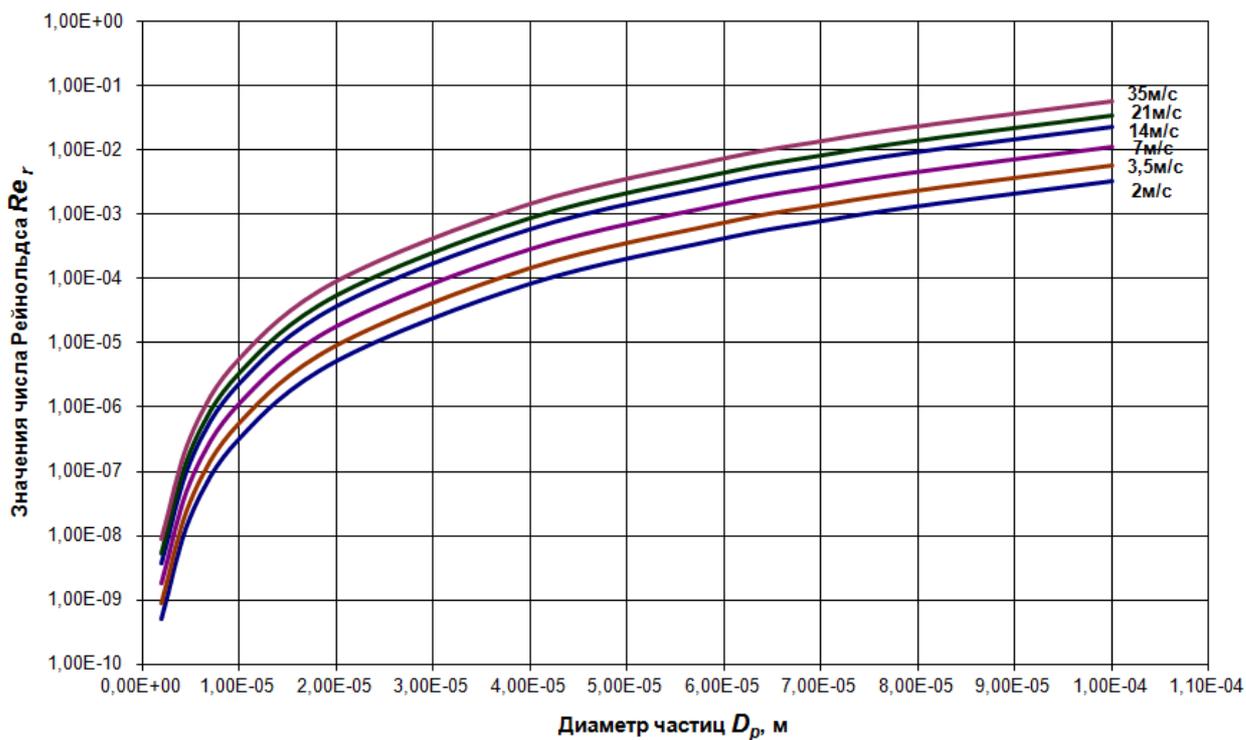


Рис. 3.2. Зависимость относительного числа Рейнольдса Re_r для аппарата ВКУ от размера осаждаемых частиц D_p , м

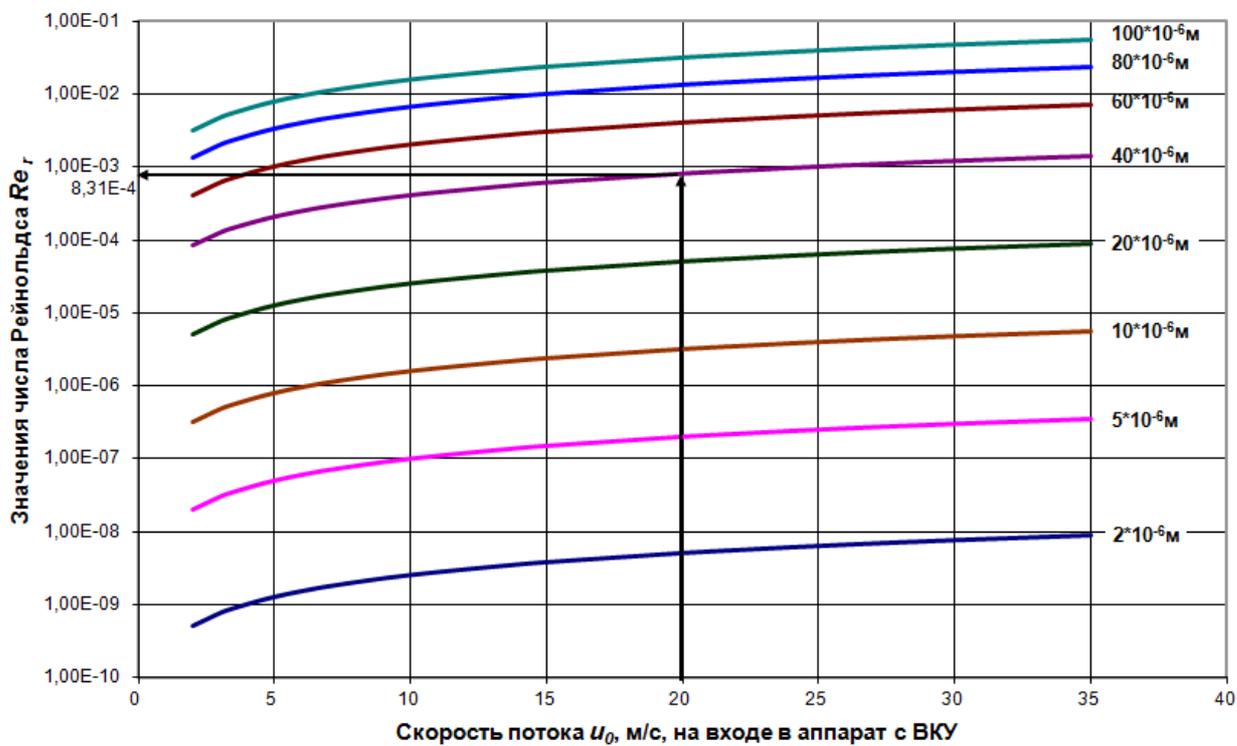


Рис. 3.3 Зависимость относительного числа Re_r для аппарата ВКУ от скорости потока на входе в циклон u_0 , м/с

Необходимо принять во внимание и различие опытных условий. Испытания циклонов на заводах–изготовителях проводятся с твердофазными загрязнителями в сухих выбросах, а в работе [229] изучался трехфазный поток. Наличие большого количества влаги в опытах могло обеспечивать повышенную степень очистки вследствие слипания и укрупнения твердых увлажненных частиц. В аппарате с ВКУ сечение перекрывается факелом распыла, и далее происходит сепарация капель, размер которых крупнее среднего диаметра частиц золы. Поэтому при оценке ВКУ остаются еще неучтенными затраты на обеспечение эффективности захвата частиц золы жидкостью, распыленной в вихревом сепараторе.

Таблица 3.1.

Зависимость числа Re_r для аппарата ВКУ от размера осаждаемых частиц D_p , м и скорости потока на входе в циклон u_0 , м/с

$\frac{D_p}{u_0}$	2	3	3.5	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2.00E-06	5.19E-10	7.79E-10	9.08E-10	1.04E-09	1.30E-09	1.56E-09	1.82E-09	2.08E-09	2.34E-09	2.60E-09	2.85E-09	3.11E-09	3.37E-09	3.63E-09
5.00E-06	2.03E-08	3.04E-08	3.55E-08	4.06E-08	5.07E-08	6.08E-08	7.10E-08	8.11E-08	9.12E-08	1.01E-07	1.12E-07	1.22E-07	1.32E-07	1.42E-07
1.00E-05	3.24E-07	4.87E-07	5.68E-07	6.49E-07	8.11E-07	9.73E-07	1.14E-06	1.30E-06	1.46E-06	1.62E-06	1.78E-06	1.95E-06	2.11E-06	2.27E-06
2.00E-05	5.19E-06	7.79E-06	9.08E-06	1.04E-05	1.30E-05	1.56E-05	1.82E-05	2.08E-05	2.34E-05	2.60E-05	2.85E-05	3.11E-05	3.37E-05	3.63E-05
4.00E-05	8.31E-05	1.25E-04	1.45E-04	1.66E-04	2.08E-04	2.49E-04	2.91E-04	3.32E-04	3.74E-04	4.15E-04	4.57E-04	4.98E-04	5.40E-04	5.81E-04
6.00E-05	1.20E-04	1.80E-04	2.10E-04	2.40E-04	3.00E-04	3.60E-04	4.20E-04	4.80E-04	5.40E-04	6.00E-04	6.60E-04	7.20E-04	7.80E-04	8.40E-04
7.00E-05	1.40E-04	2.10E-04	2.45E-04	2.80E-04	3.50E-04	4.20E-04	4.90E-04	5.60E-04	6.30E-04	7.00E-04	7.70E-04	8.40E-04	9.10E-04	9.80E-04
8.00E-05	1.60E-04	2.40E-04	2.80E-04	3.20E-04	4.00E-04	4.80E-04	5.60E-04	6.40E-04	7.20E-04	8.00E-04	8.80E-04	9.60E-04	1.04E-03	1.12E-03
1.00E-04	2.00E-04	3.00E-04	3.50E-04	4.00E-04	5.00E-04	6.00E-04	7.00E-04	8.00E-04	9.00E-04	1.00E-03	1.10E-03	1.20E-03	1.30E-03	1.40E-03

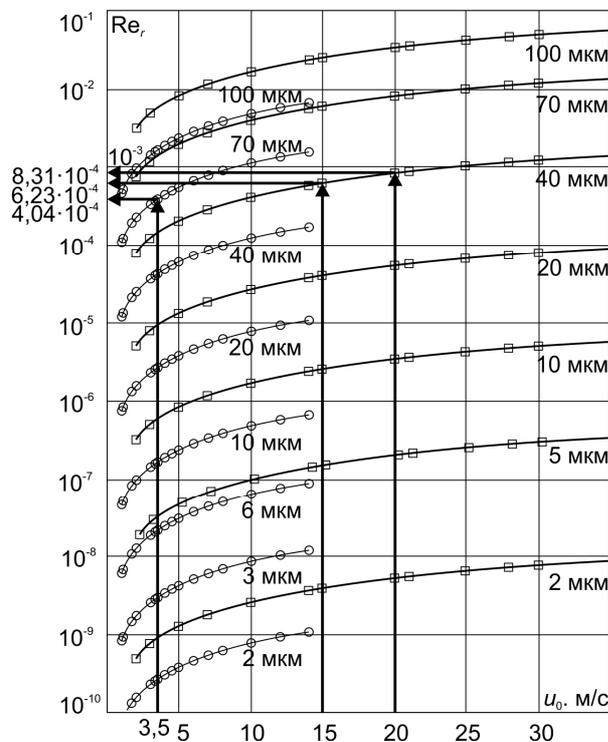


Рис. 3.4 Расчетные зависимости числа Re_r для циклона ЦН-15 (линии с круглыми расчетными точками) и аппарата ВКУ (линии с квадратными расчетными точками)

Выполним оценку верхней границы энергозатрат на процессы захвата частиц каплями. Для этого примем, что частицы золы не смачиваемые: поскольку они выталкиваются из жидкости силами взаимодействия молекул в зоне контакта твердой и жидкой фаз, то совершаемая при захвате работа будет максимальной.

Работа, производимая молекулами на поверхности единичной площади, равна по величине поверхностному натяжению σ , или силе взаимодействия твердой и жидкой фаз на единице длины линии контакта. На рис. 3.5а показано равновесное положение твердой сферической частицы на поверхности не смачивающей жидкости. Уравнение Юнга (условие равновесия межмолекулярных сил) для него, в котором взаимодействующие силы отнесены к единице длины контакта и выражены через поверхностные натяжения на соответствующих границах раздела фаз, записывается в виде:

$$\sigma_{G,S} = \sigma_{L,S} + \sigma_{G,L} \cos \Theta, \quad (3.24)$$

где $\sigma_{G,S}$, $\sigma_{L,S}$, $\sigma_{G,L}$ – поверхностные натяжения на границах газообразной и твердой, жидкой и твердой, газообразной и жидкой фаз соответственно; Θ – угол смачивания.

Из сопоставления (3.24) с условием сохранения энергии при адгезии (уравнением Дюпре), можно видеть, что работа адгезии L_a пропорциональна смачиваемости частиц:

$$L_a = \sigma_{G,L} (\cos \Theta + 1). \quad (3.25)$$

Для жидкостей с одинаковым поверхностным натяжением величина L_a минимальна при полном несмачивании ($\Theta = 180^\circ$ и $\cos \Theta = -1$) поверхности твердой фазы. Следовательно, на захват частиц, не смачивающихся улавливающей жидкостью, будет затрачиваться максимальное количество энергии.

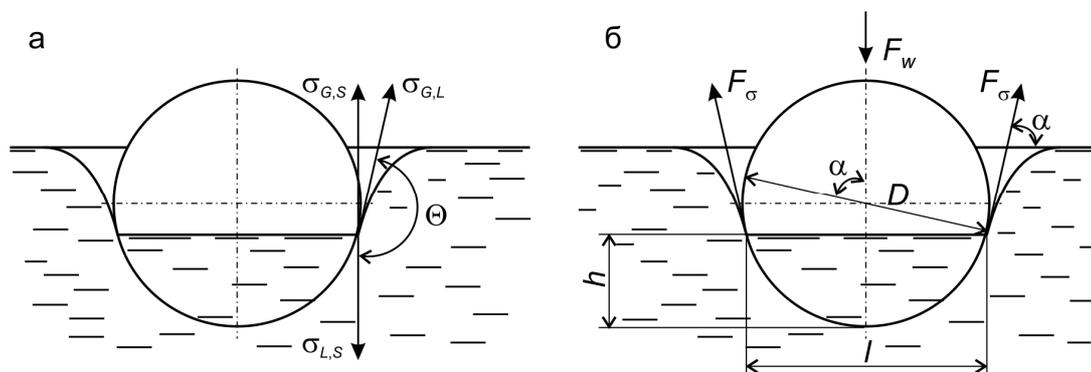


Рис. 3.5 Сферическая твердая частица на поверхности не смачивающей жидкости в состояниях: а – равновесия, б – движения со скоростью w : F_w – сила, действующая на пленку жидкости за счет кинетической энергии частицы; D – диаметр частицы; l – проекция периметра смачивания; h – глубина погружения (пояснения к остальным обозначениям в тексте)

Смачиваемость твердых частиц зависит не только от свойств материала, но еще и от их размера. Известно, что частицы мельче 10 мкм независимо от вида материала плохо смачиваются любыми жидкостями. Вряд ли будут оправданы энергозатраты на работу вихревых аппаратов, не пригодных для улавливания частиц дисперсной взвеси размером 2,5...10 мкм. Поэтому в оценках эффективности захвата частиц зола работу адгезии примем равной нулю. Будем считать, что капля жидкости захватит частицы, которые за счет своей кинетической энергии смогут преодолеть силу выталкивания, приблизительно равную силе поверхностного натяжения F_σ .

Очевидно (рис. 3.5б), что захвату частицы со смыканием жидкости за ней соответствует значение угла $\alpha=180^\circ$, а элементарная работа выталкивания: $dL_\sigma = F_\sigma \sin\alpha \cdot dh$. Сравнивая с L_σ кинетическую энергию частицы плотностью ρ_p кг/м³, радиусом $r = D/2$ м, перемещающейся со скоростью w м/с, получают условие ее захвата $\pi r^3 \rho_p w^2 > 4\pi r^2 \sigma$ и минимальное значение скорости:

$$w > 2\sqrt{\sigma / (r\rho_p)}. \quad (3.26)$$

Оценочно, по (3.26), величина минимально необходимой скорости w частиц радиусом $r = 1,25$ мкм, плотностью $\rho_p = 1500$ кг/м³, для погружения в каплю воды с поверхностным натяжением $\sigma = 72 \cdot 10^{-3}$ Н/м, составит 12,4 м/с. Примем во внимание, что морфология частиц зола по форме, как правило, отличается от сферической, и работа их погружения будет больше расчетной для сферических частиц. Следовательно, подвергать обработке в вихревых сепараторах выбросы с частицами размером менее 2,5 мкм (соответствующие классу PM_{2,5}) по энергетическим затратам не целесообразно, так как для их захвата каплями потребуются скорости более 15-20 м/с. Аппараты типа ВКУ при скорости потока 20 м/с имеют сопротивление порядка 5...7 кПа [234], и энергозатраты для сепарации зола с частицами класса PM_{2,5} достигнут 140...200 кВт на каждые 100 тыс. м³/ч обрабатываемых дымовых газов.

С расчетами по скорости погружения и данными работы [234] также согласуются результаты расчетов по параметру Re_r (рис. 3.4): рассмотренный аппарат не имеет возможности обеспечить обработку частиц класса PM_{2,5} с эффективностью 99%, т.к. максимально достигаемое значение $Re_r = 10^{-7}$, что на 3...4 порядка ниже требуемой величины $Re_r = 6,23 \cdot 10^{-4}$. Соответствующее конструктивным характеристикам указанного аппарата значение $Re_r = 10^{-7}$ может обеспечить степень осаждения частиц класса PM_{2,5} до 50%.

Таким образом, при помощи параметра Re_r могут быть вычислены фракционные коэффициенты осаждения взвешенных частиц и найдены оптимальные по энергетическим затратам конструктивные параметры вихревых золоуловителей, которые представляются перспективными для организации совместной очистки дымовых газов от золы и диоксида серы.

В целом результаты исследований данного раздела показывают, что параметр Re_r позволяет адекватно находить значения основных характеристик сепараторов с вращательным движением многофазных потоков расчетным путем. Несмотря на то, что конструктивные параметры циклонов и вихревых аппаратов с ВКУ, а также способы обработки выбросов имеют существенные отличия, расчеты на основе Re_r приводят к результатам, близким к опытным. Поэтому значение числа Re_r для аппаратов не только циклонного, но и вихревого типов может рассматриваться как определяющий критериальный параметр. С его помощью могут быть вычислены фракционные коэффициенты очистки примеси в аппаратах, реализующих принцип отделения примеси от газовой части выброса вследствие их различия инерционных параметров.

3.1.4 Проверка возможности использования числа Re_r при инерционном осаждении частиц золы на препятствие из обтекающего потока

Число Re_r получено путем сопоставления наиболее общих характеристик, присущих физическим объектам – энергетических параметров и действий потока и частицы. Следовательно, он должен быть достаточно универсальным. Показателем этого является возможность его использования в процессах сепарации, основанных на инерционных свойствах частиц. Одновременно это служит доказательством универсальности разработанного в разделе 2.3.1 алгоритма и метода исследования процессов посредством сопоставления энергетических параметров и действий участвующих в них физических объектов. Для проверки адекватности значения Re_r как показателя степени осаждения частиц при обтекании одиночной частицы были выполнены численные исследования при помощи программного комплекса Fluent на двухмерной модели [235, 236]. В численных расчетах также использовалась k - ε модель со «стандартными» пристенными функциями. Для получения замкнутой системы уравнений турбулентного движения при решении плоской задачи вводятся модельные k - ε соотношения, в которых используются уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \bar{u}_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{H}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon; \quad \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon \bar{u}_i) = \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_r}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Здесь коэффициент турбулентной вязкости определяется как

$$N = \rho c_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (3.28)$$

Значения используемых в программе по умолчанию констант:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92; \sigma_k = 1; \sigma_{\varepsilon} = 1,3; c_{\mu} = 0,09. \quad (3.29)$$

приняты как наиболее надежные в соответствии с ([230]), что было также отмечено и в предыдущем разделе 3.1.1.

Пристенные функции

Соотношения (3.27, 3.28, 3.29) справедливы в том случае, если можно пренебречь молекулярной вязкостью η по сравнению с η_t , определяемым из (3.28). У стенки (вблизи твердой поверхности) турбулентность сходит на нет, и влияние молекулярной вязкости η усиливается. Для учета этого процесса вводятся т. наз. «пристенные» функции ([230]), которые обеспечивают связь переменных, получающихся в каждой итерации решаемых уравнений в пристенных ячейках, с их граничными значениями.

Стандартные пристенные функции, представленные в программе, выработаны в результате обобщения большого числа опытных данных для широкого круга ситуаций, встречающихся на практике. Эти функции в программе определяются по умолчанию.

В соответствии с теорией пограничного слоя, перенос в пристенной области с достаточной для большинства течений точностью можно аппроксимировать закономерностями четырех типов. В нижнем, прилегающем к поверхности межфазовом слое, поток неподвижен (молекулы адсорбированы поверхностью), и скорость его равна нулю (см. разд. 2.5.1 и Рис. 2.8). Перенос массы здесь происходит при адсорбции и десорбции молекул, а энергия передается путем изменения колебательных и вращательных уровней адсорбированных элементов (атомов, молекул, ионов). В следующем – «вязком подслое» (область действия), имеет место ламинарный режим движения. Перенос энергии, импульса и массы здесь лимитируется молекулярной вязкостью и подсчитывается программой по линейному закону. Во внешнем слое, граничащем с турбулентным потоком, основную роль играет турбулентность. В промежуточной области между вязким подслоем и внешним слоем сказывается действие и молекулярной вязкости, и турбулентности. Здесь перенос подсчитывается по логарифмическому закону. Верхняя граница действия логарифмического закона зависит от числа Рейнольдса и определяется в ходе решения.

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^*), \quad (3.30)$$

$$y^* \equiv \rho y_p \sqrt[4]{C_\mu} \sqrt{k_p} / \eta, \quad (3.31)$$

$$U^* \equiv \rho U_p \sqrt[4]{C_\mu} \sqrt{k_p} / T_w, \quad (3.32)$$

где y^* , U^* – безразмерные расстояние и скорость; κ – константа фон Кармана (по умолчанию $\kappa = 0,42$); E – эмпирическая константа (по умолчанию $E = 9,81$); U_p – среднее значение скорости потока возле т. P ; k_p – турбулентная кинетическая энергия возле т. P ; y_p – расстояние от т. P до стены; т. P – точка, находящаяся в узле ячейки, смежной со стенкой. Логарифмический закон используется, когда $y^* > 11,225$. Если в смежных со стеной ячейках $y^* < 11,225$, программа использует соотношения для ламинарного течения.

Исследованы характеристики обтекания препятствий диаметром 100, 200, 500 и 1250 мкм. Для мониторинга за формированием течения у препятствия решалась нестационарная задача с шагом по времени $(2-5) \cdot 10^{-6}$ с и максимальным числом итераций в шаге до 100. Пространственная сетка после построения в препроцессоре Gambit адаптировалась от двух до четырех раз в программе Fluent до получения стабильных результатов, влиянием на которые дальнейшего измельчения сетки можно было пренебречь. Зоны адаптации для препятствий диаметром 100 и 500 мкм показаны на Рис. 3.6, Рис. 3.7, Рис. 3.8, Рис. 3.9. Окончательно для препятствий диаметром 100 и 200 мкм принята двухкратная адаптация. Для препятствий 500 и 1250 мкм было принято большее измельчение исходной сетки при построении в препроцессоре. Так например, пробная сетка для препятствия диаметром 500 мкм с четырехкратной адаптацией в программе представлена на Рис. 3.9, а окончательный вариант с построением более мелкой сетки в препроцессоре и трехкратной адаптацией в самой программе – на Рис. 3.10.

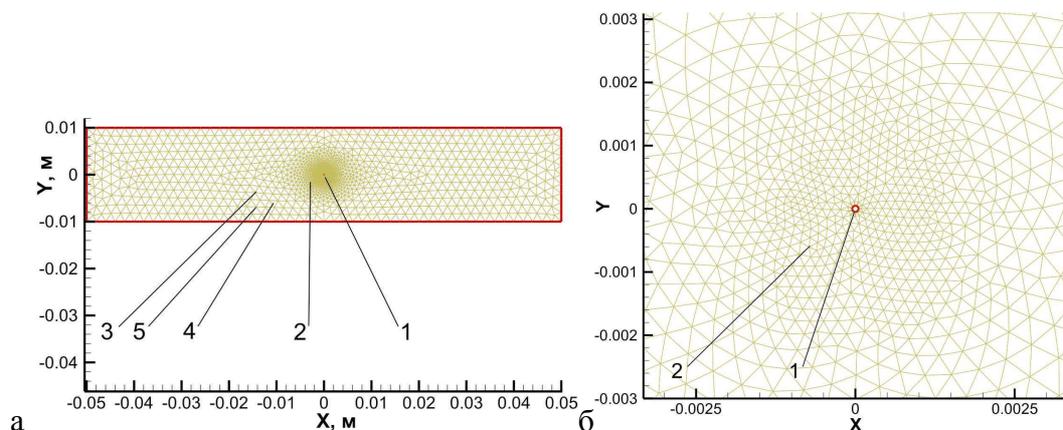


Рис. 3.6. Диаметр препятствия $D_{ob} = 100 \mu\text{м}$, неадаптированная сетка (число ячеек $C = 3118$, число узлов $N = 1627$): а – вся расчетная зона, б – вид ячеек вблизи препятствия. 1 – препятствие, 2 – область неадаптированной сетки вблизи препятствия, 3 – внешняя область неадаптированной сетки, 4, 5 – элементы сетки: ячейка, узел

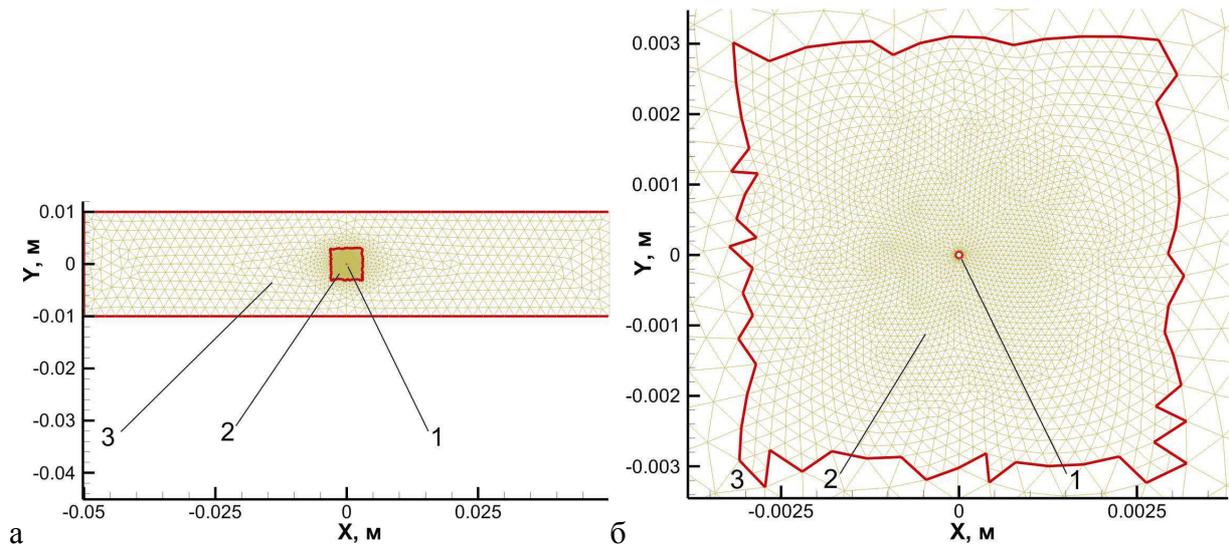


Рис. 3.7. Диаметр препятствия $D_{ob} = 100\mu\text{м}$, 1-я адаптация (количество ячеек $C = 7228$, количество узлов $N = 3721$): а – вся расчетная зона; б – вид ячеек в зоне адаптации

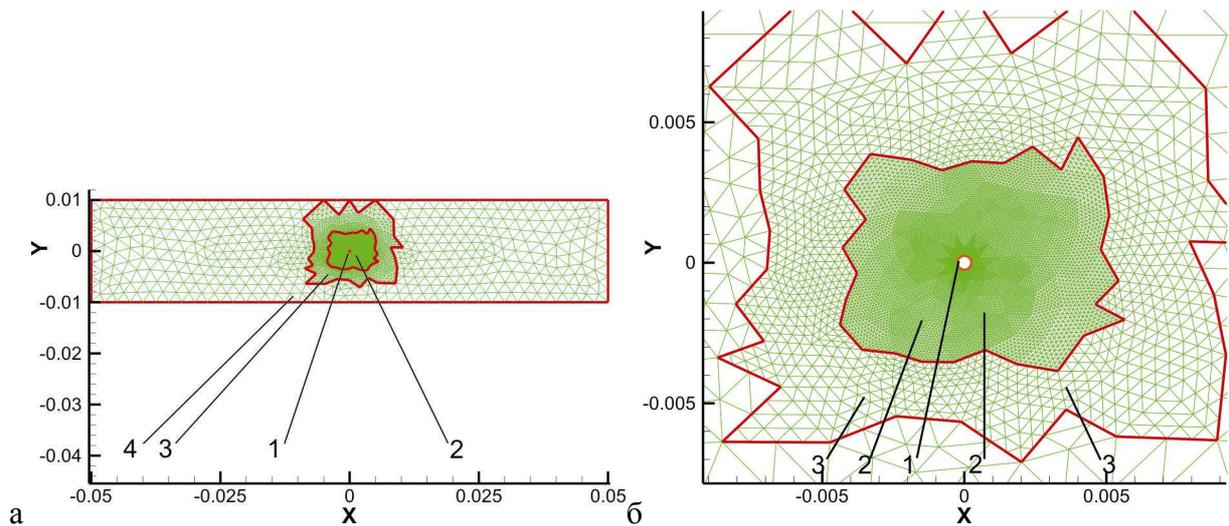


Рис. 3.8. Диаметр препятствия $D_{ob} = 500\mu\text{м}$, 2-я адаптация (количество ячеек $C = 17840$, количество узлов $N = 9116$): а – вся расчетная зона; б – вид ячеек в зонах адаптации

Эффективность фильтрации запыленных потоков в пористой среде определяется в настоящее время путем непосредственных замеров или по эмпирическим параметрам, полученным на моделях поперечного обтекания цилиндрических препятствий. Обычно используемые модели имеют диаметр порядка 0,5 дюйма и более. Возмущения, вносимые ими в обтекающий поток, существенно перекрывают энергию частиц. К примеру, ламинарный поток начинает уплотняться перед препятствием радиусом R_{ob} на расстоянии приблизительно $3R_{ob}$, которое при $R_{ob} = 0,25$ дюйма превышает средний размер частиц обычной пыли на 3 порядка. Большинство их успевает плавно обойти препятствие вместе с линиями тока, не сталкиваясь с ним. При фильтрации на волокнах линии тока имеют малые радиусы кривизны, а размеры

частиц и препятствий сопоставимы. Поэтому необходимо уточнение значений используемых в расчетах эмпирических параметров.

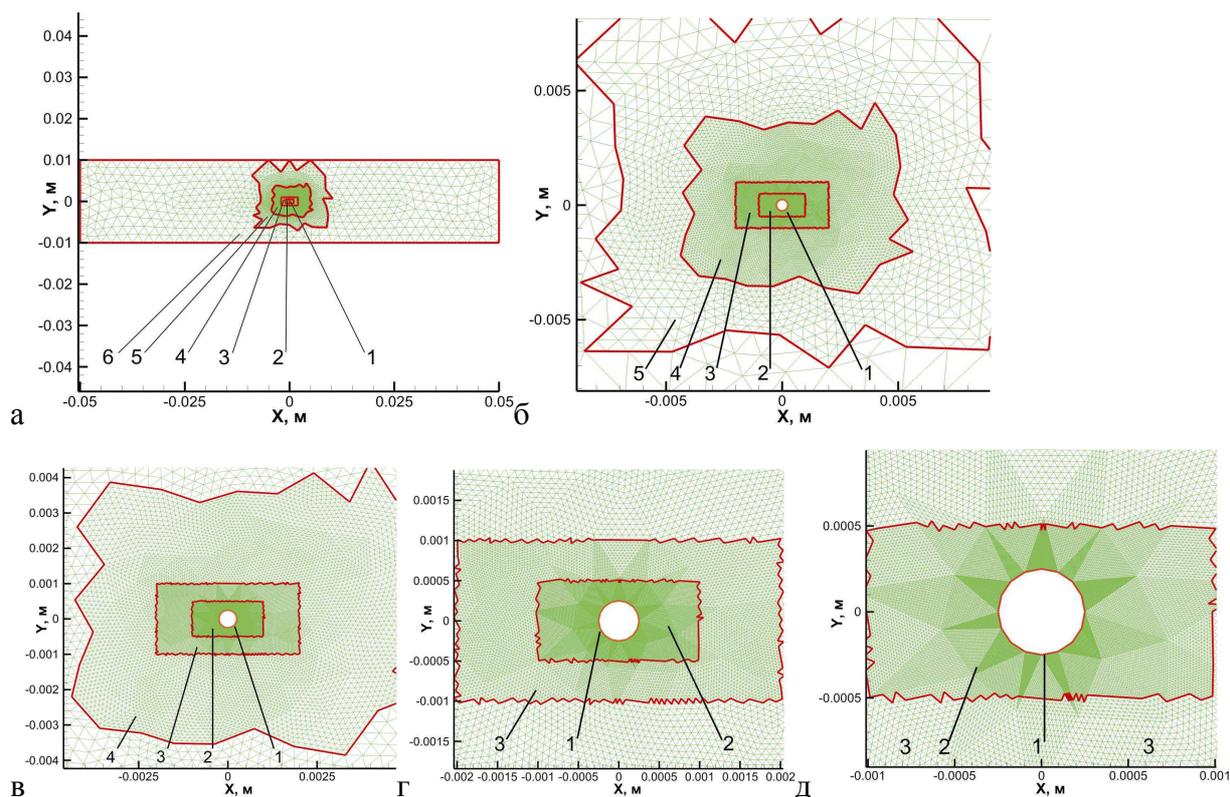


Рис. 3.9. Диаметр препятствия $D_{ob} = 500\text{мкм}$, 4-кратная адаптация (количество ячеек $C = 58802$, количество узлов $N = 30011$): а – вся расчетная зона; б...д – вид ячеек и размеры зон адаптации 1– препятствие, 2...5 – зоны 1... 4 адаптации

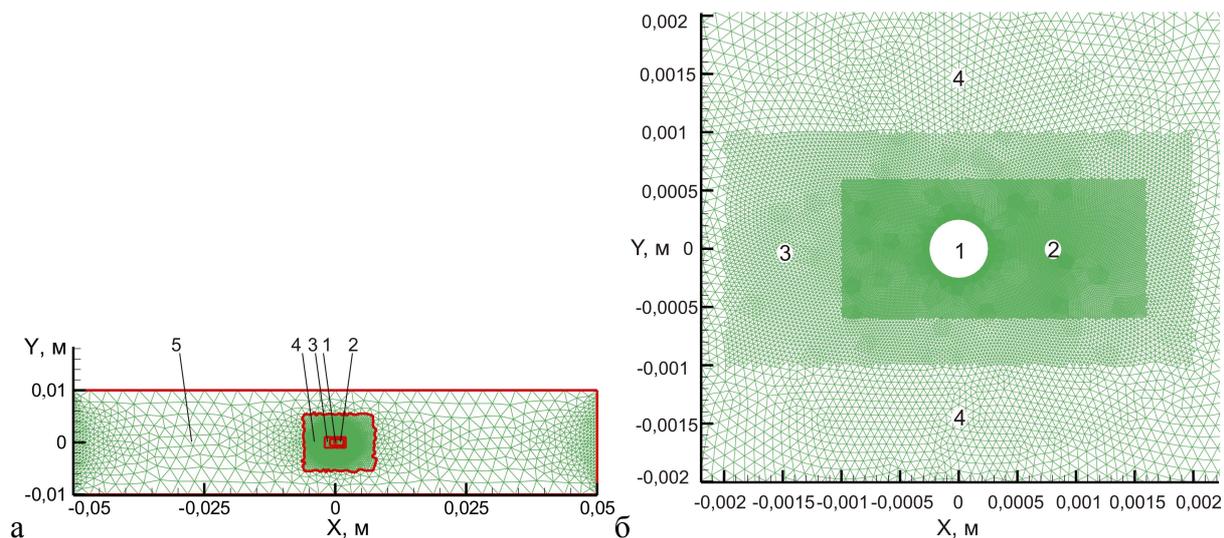


Рис. 3.10. Расчетная область (а) и зоны окончательной адаптации (б) для препятствия : 1– препятствие, 2, 3, 4 – зоны 3-х (количество ячеек $C = 80192$, узлов $N = 31235$), 2-х и однократной адаптации, 5 – неадаптированная сетка ($C = 21128$, $N = 8745$)

Обтекание мелких препятствий можно исследовать корректно посредством численного эксперимента на базе методов *CFD*. Выполнено численное исследование обтекания длинных

круговых цилиндров с диаметрами D_{ob} 10^{-4} , $2 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$ и $1,25 \cdot 10^{-3}$ м при помощи программного комплекса *Fluent*. С целью мониторинга за зоной вокруг препятствия при формировании потока была поставлена нестационарная задача с шагом по времени $(2-5) \cdot 10^{-6}$ с и числом итераций в шаге до 100. Программой учитывается генерация турбулентной кинетической энергии за счет градиентов средней скорости и (при необходимости) сил плавучести.

Режимы обтекания определялись по числу Рейнольдса Re_{ob} для препятствия (определяющие параметры – D_{ob} и скорость невозмущенного потока u_0): до 1 – вязкий, от 1 до 1000 – переходный к потенциальному. Размер препятствий в фильтрах не превосходит 10^{-3} м. Поэтому область исследований, имеющая значение для исследуемой задачи, не выходит за $Re_{ob} = 1000$. Параметры потока: плотность $\rho_G = 1,225$ кг/м³, динамический коэффициент вязкости $\eta = 17,9 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Расчеты показали стабильную сходимость результатов при числе шагов не менее 1000 и 3-х кратной адаптации зоны у препятствия размером более $20 D_{ob}$. Зоны одно-, двух- и трехкратной адаптации (зоны 4, 3, 2, Рис. 3.11) препятствия с $D_{ob} = 500$ мкм имеют следующие координаты: X_4 – от -0,006 м до 0,0075 м, Y_4 – от -0,0055 м до 0,0055 м; X_3 – от -0,002 м до 0,002 м, Y_3 – от -0,001 м до 0,001 м; X_2 – от -0,001 м до 0,0016 м, Y_2 – от -0,0006 м до 0,0006 м.

Получено хорошее согласование основных параметров обтекания с данными классических натуральных исследований [237]. Наблюдается совпадение опытных и расчетных линий тока перед препятствием, их хорошее качественное и количественное соответствие по контуру, ограничивающему рециркуляционную зону (Рис. 3.11).

Различие опытных и расчетных значений относительного расстояния до центров вихрей, рассматриваемого М. Ван-Дайком в качестве характерного параметра потока до режимов обтекания с $Re_{ob} \approx 40$, не превосходит 5% [238, 239]. По результатам исследований уточнена схема обтекания препятствий диаметром менее $1,25 \cdot 10^{-3}$ м. На рис. 3.12 показаны характерные параметры потока при обтекании препятствия с $D_{ob} = 500$ мкм в режиме с $Re_{ob} = 26$. В исследованных режимах линии тока изгибаются не далее чем за $1,6 R_{ob}$ до препятствия. Для препятствий с $2R_{ob}$ от $1,25 \cdot 10^{-3}$ м до $5 \cdot 10^{-4}$ м расстояние R от препятствия до изгиба линий тока слабо зависит от Re_{ob} (относительное расстояние $R_r = R/R_{ob}$ уменьшается от 1,6 до 1,2), а при $2R_{ob} < 5 \cdot 10^{-4}$ м корреляция между ними пропадает, и R_r остается равным 1,47...1,48 – см. рис. 3.13, рис. 3.14, рис. 3.15.

Характерно, что расстояние R до изгиба линий тока отмеряется не от центра частицы, а от полюсов, положение которых стабильно во всех исследованных режимах. Они находятся на пересечении линий тока, расположенных в невозмущенном потоке на $1/3 R_{ob}$ выше и ниже

центра препятствия, с лучами, направленными из его центра навстречу потоку (отклонение от вертикали $\sim 2,5^\circ$). В дальнейшем указанные линии тока были приняты за базовые, а радиусы их изгиба (R_{16} на рис. 3.12) – за максимально возможные при инерционном захвате частиц препятствием. При определении математической модели поворотного движения потока перед препятствием считалось, что частицы, движущиеся по линиям тока с превосходящими радиусами изгиба, обходят препятствие.

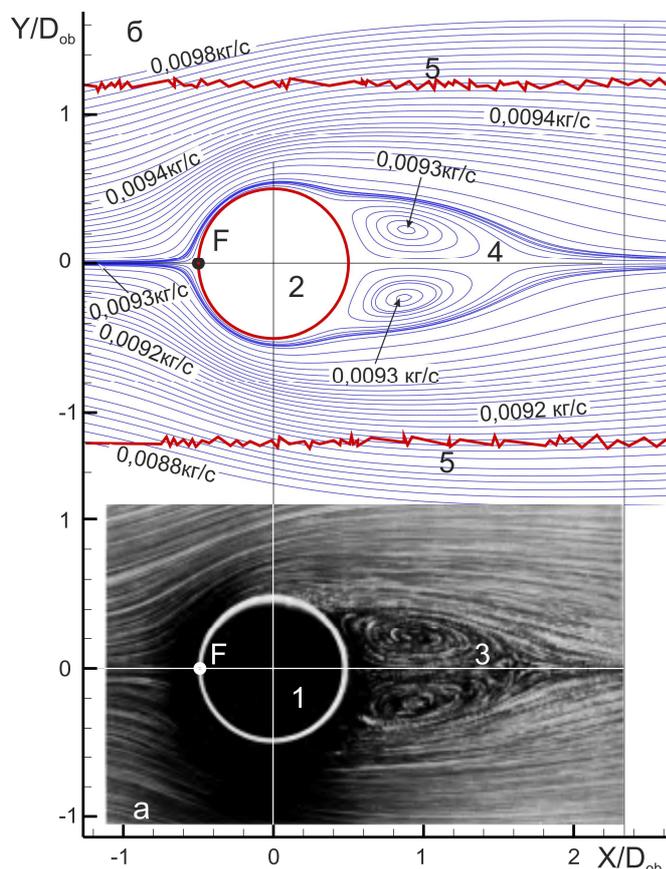


Рис. 3.11. Обтекание круглого цилиндра в натурных испытаниях по М. Ван-Дайку, фото № 42, Sadatoshi Taneda, 1956, (а) и в численном эксперименте (б): F – центр сопротивления; 1, 2 – модели препятствия диаметром 0,5 дюйма и 500 мкм; 3, 4 – зоны рециркуляции; 5 – границы зоны 3-х кратной адаптации расчетной области в численном эксперименте

Поток рассматривался в виде совокупности 16 линий тока. Значения их расчетных радиусов кривизны в точках поворота R_1 - R_{16} представлены на рис. 3. Центральная линия с радиусом $R_1 \approx 5 \cdot 10^{-6}$ м принята в качестве огибающей препятствие, которая, по [240], понимается «не в математическом смысле, а в смысле предельного положения, к которому стремится линия тока».

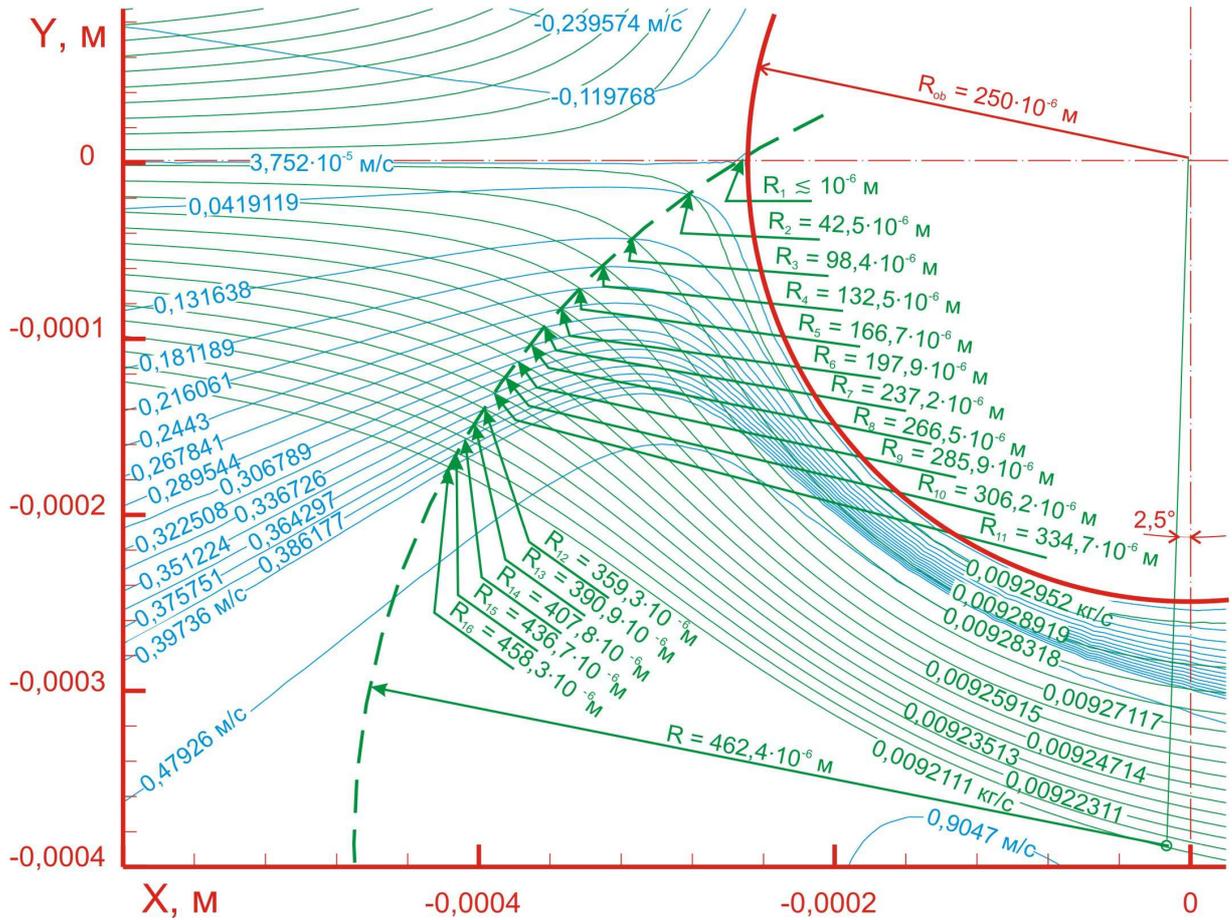


Рис. 3.12. Характеристики потока на повороте перед препятствием с $R_{ob}=250 \cdot 10^{-6}$ м при $Re_{ob}=26$ (невозмущенный поток движется горизонтально слева направо). На линиях тока указаны значения функций тока (кг/с), на изотогах – скорости потока (м/с)

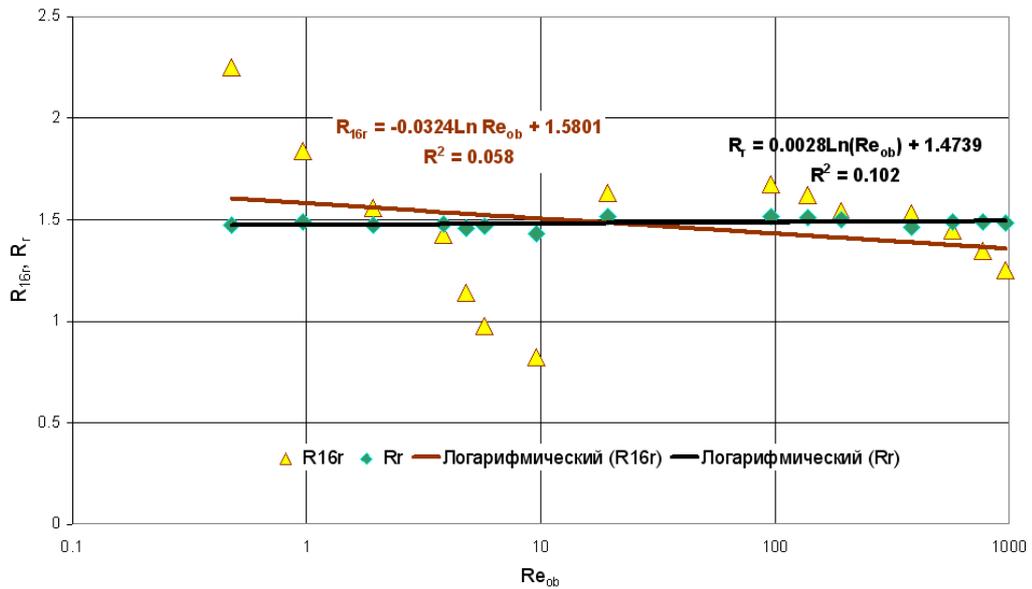


Рис. 3.13. Относительные радиусы закругления линий тока R_{16r} и расстояния R_r до их поворота перед препятствием диаметром 200 мкм

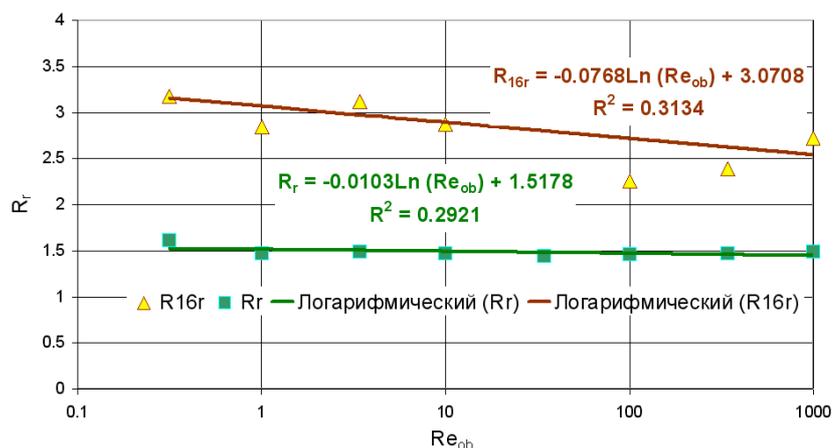


Рис. 3.14 Относительные радиусы закругления линий тока R_{16r} и расстояния R_r до их поворота перед препятствием диаметром 500 мкм

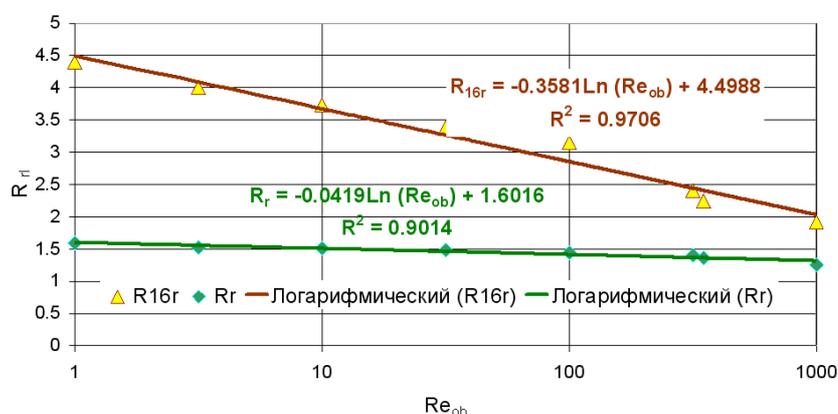


Рис. 3.15. Относительные радиусы закругления линий тока R_{16r} и расстояния R_r до их поворота перед препятствием диаметром 1250 мкм

Поворотное движение потока перед препятствием при составлении математической модели представлено в виде вращения по круговым линиям тока, симметрично обращенным относительно касательных в точках поворота. Такое вращение можно аппроксимировать степенной функциональной зависимостью

$$w_i R_i^k = \text{Const}, \quad (3.33)$$

где R_i – радиусы круговых линий тока. Чтобы получить зависимость значений тангенциальной скорости w_i в i -тых точках поворота от их радиусов R_i , на линии тока было наложено соответствующее поле скоростей (см. рис. 3.12). Результаты обработки данных приведены на рис. 3.16.

С минимальным среднеквадратичным отклонением r^2 от результатов численных исследований согласуется значение $k = -0,8425$ (Рис. 3.16, линия 2), и

$$w R^{-0,8425} = \text{const} \quad (3.34)$$

Модель близка к квазитвердому вращению, что не противоречит физической сути процесса и граничным условиям: с уменьшением R_i , т.е. с приближением потока, тормозящее действие препятствия растёт, и w_i уменьшается до $w_0 = 0$ при $R_i = 0$. Результаты численных исследований с достаточно высокой точностью могут быть также аппроксимированы полиномиальной зависимостью (Рис. 3.16, линия 3) с показателем степени $k < -1$:

$$w = -10^3 (R + 1)(10^3 R - 1,47), \quad (3.35)$$

Однако она недостаточно удовлетворяет граничным условиям: при $R_i = 0$ скорость принимает отрицательные значения.

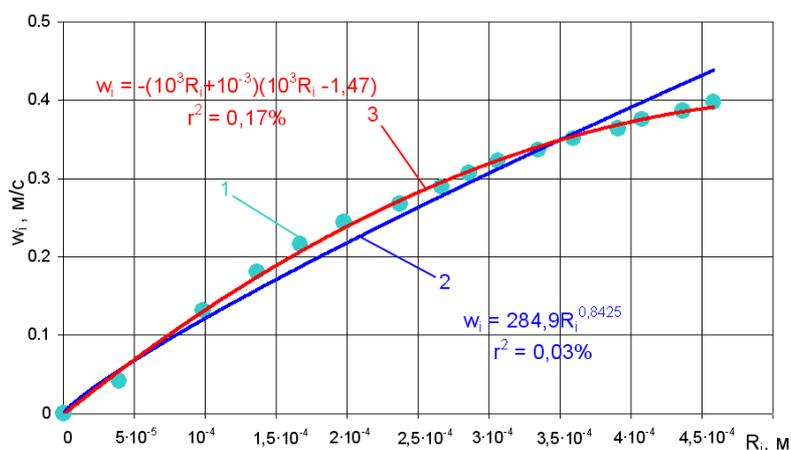


Рис. 3.16. К модели поворотного движения потока перед препятствием: 1 – данные численных исследований; 2, 3 – степенная и полиномиальная линии тренда; R_i , w_i – радиусы кривизны линий тока и тангенциальные скорости потока в i -тых точках поворота; r^2 – среднеквадратичные отклонения значений w_i по уравнениям линий тренда от данных исследования

Для вывода выражения радиального градиента силы f_R используем данные, полученные в численных исследованиях. Расход между крайними линиями тока ψ_2 и ψ_{16} при расстоянии между ними в невозмущенном потоке $R_{ob}/3$ и высоте потока H можно представить как

$$W = H w_0 R_{ob} / 3, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.36)$$

В соответствии с результатами исследований, значения функций крайних линий тока ψ_2 и ψ_{16} равны $929,52 \cdot 10^{-5}$ кг/с и $921,11 \cdot 10^{-5}$ кг/с. Тогда расход потока между ними W равен $8,41 \cdot 10^{-5}$ кг/с, или $6,86 \cdot 10^{-5}$ м³/с. Для получения расхода газа между крайними линиями тока в сечении той же высоты на повороте потока перед частицей необходимо интегрировать по местным скоростям с учетом их распределения по радиусу в соответствии с выражением (3.34):

$$W = H \int_{l_1}^{l_4} w dR = H w R^{-0,8425} \int_{R_1}^{R_4} R^{0,8425} dR = 0,543 H w R^{-0,8425} (R_{16}^{1,8425} - R_2^{1,8425}) \quad (3.37)$$

Расход газа по (3.36) и (3.37) определяется между одними и теми же линиями тока и равен $6,86 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$. Поэтому

$$w_0 R_{ob} / 3 = 0,543 w R^{-0,8425} (R_{16}^{1,8425} - R_1^{1,8425}) \quad \text{и} \quad (3.38)$$

$$w = 0,614 w_0 \frac{R^{0,8425} \cdot R_{ob}}{R_{16}^{1,8425} - R_2^{1,8425}} \quad (3.39)$$

Результаты исследований показали наличие корреляции между радиусом кривизны базовой линии тока R_{16} и Re_{ob} для препятствий диаметром более 1000 мкм (Рис. 3.15). Величина $R_{16r} = R_{16}/R_{ob}$ снижается с 4,4 до 1,92 при изменении режима обтекания Re_{ob} от 1 до 1000. Для препятствий диаметром 500 мкм зависимость R_{16r} от Re_{ob} выражена намного слабее – значения R_{16r} находятся в интервале 3,1...2,3. При меньших размерах препятствий корреляция пропадает: при изменении Re_{ob} от 0,959 до 959 значения R_{16r} находятся в интервале 1,8...0,75. Обработка результатов численных исследований дает для препятствий диаметром более 1000 мкм зависимость в виде $R_{16}/R_{ob} = 4,402 - 2,48 \cdot 10^{-3} Re_{ob}$. Обобщение полученных данных для препятствий диаметром 500 мкм и менее дает соотношение $R_{16r} = R_{16}/R_{ob} \approx 1,67$; $R_{16} = 1,67 R_{ob}$

Произведем замену в (3.39):

$$w = 0,368 w_0 \frac{R^{0,8425} \cdot R_{16}}{R_{16}^{1,8425} - R_2^{1,8425}} \quad (3.40)$$

Тогда

$$\begin{aligned} dp &\approx \rho_G \frac{w^2}{R} dR = \rho_G \frac{w_0^2}{R} \left(\frac{0,368 R^{0,8425} \cdot R_{16}}{R_{16}^{1,8425} - R_2^{1,8425}} \right)^2 dR = \\ &= \frac{0,135 R^{1,685} \rho_G w_0^2}{R} \left[\frac{R_{16} \cdot R_{16}^{-1,8425}}{1 - (R_2/R_{16})^{1,8425}} \right]^2 dR = \frac{0,135 R^{0,685} \rho_G w_0^2 R_{16}^{-1,685}}{\left[1 - (R_2/R_{16})^{1,8425} \right]^2} dR = \\ &= \frac{0,135 R_{16} \rho_G w_0^2}{R_{16} \left[1 - (R_2/R_{16})^{1,8425} \right]^2} \left(\frac{R}{R_{16}} \right)^{0,685} d \left(\frac{R}{R_{16}} \right) \end{aligned} \quad (3.41)$$

Здесь радиальный градиент силы может быть представлен в виде:

$$f_R = \frac{R_{16} \rho_G w_0^2}{\left[1 - (R_2/R_{16})^{1,8425}\right]^2} \text{ Па}\cdot\text{м}, \quad (3.42)$$

а значение

$$a_{ob} = f_R / w_0 = \frac{R_{16} \rho_G w_0}{\left[1 - (R_2/R_{16})^{1,8425}\right]^2} \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad (3.43)$$

есть удельное действие, совершаемое над единицей объема (1м^3) потока выбросов, поворачивающего при обтекании препятствия. Отнеся его к динамическому коэффициенту вязкости потока, получим число Рейнольдса для вращающегося потока, представляющее действие над потоком, обтекающим препятствие:

$$\text{Re}_{rot} = a_{ob} / \eta = f_R / w_0 \eta = \frac{R_{16} \rho_G w_0}{\eta \left[1 - (R_2/R_{16})^{1,8425}\right]^2} \quad (3.44)$$

Инерционное число Рейнольдса частицы на повороте потока перед препятствием определится как $\text{Re}_p^{in} = \sqrt{3\pi} u_0 \tau_w / R_{16}$.

Число Re_r , выражающее соотношение действий частицы и потока, как отношение квадрата инерционного числа Рейнольдса частицы к инерционному числу Рейнольдса для потока, поворачивающего при обтекании препятствия, получим с учетом соотношения $R_2/R_{16}=0,092$ (Рис. 3.12):

$$\frac{(\text{Re}_p^{in})^2}{\text{Re}_{rot}} = 3\pi \left(\frac{u_0 \tau_w}{R_{16}} \right)^2 / \frac{R_{16} \rho_G w_0}{\eta \left[1 - (R_2/R_{16})^{1,8425}\right]^2} \cong 0,0284 \frac{w_0 \rho_p^2 D_p^4}{\rho_G \eta R_{16}^3} = 0,0284 \text{Re}_r \quad (3.45)$$

Таким образом, и в этом случае степень инерционной сепарации частицы, т.е. возможность сепарации вследствие того, что она продолжает по инерции двигаться в прежнем направлении, определяется на основе энергетического параметра двухфазных вращающихся потоков $\text{Re}_r = u_0 \rho_p^2 D_p^4 / \rho_G R_{16}^3 \eta$ [241], где D_p , ρ_p – диаметр, м, и плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$, частиц.

Одним из критериев инерционного захвата частиц служит число Стокса $Stk = D_p^2 u_0 \rho_p / (18 R_{ob} \eta)$. Однако все составляющие его переменные, включая радиус препятствия R_{ob} , являются характеристиками прямолинейного движения с постоянным направлением вектора скорости. Размер R_{ob} используется для установления временного масштаба как времени прохождения частицей этого расстояния со скоростью невозмущенного потока w_0 , и, соответственно, в том же направлении, а не при обтекании препятствия. Поэтому число Stk учитывает только энергию преодоления сопротивления среды, и при вычислении эффективности фильтрации его обычно дополняют другими критериями (аналогичную интерпретацию числа Стокса см. в [43]). При криволинейном движении непрерывно изменяется направление вектора скорости, что требует дополнительного количества энергии. Оно равно затрате энергии на создание центростремительного ускорения и на изменение ориентации частицы в пространстве, что можно моделировать как изменение при повороте ее момента инерции $J_p = r_p^2 \rho_p V_p$, кг·м². В комплексе Re_r обе эти особенности криволинейного движения частицы учитываются, первая – через радиус R_{16} и вторая – через произведение $\rho_p D_p^4$. Сопоставим Re_r и Stk :

$$Re_r = 72 Stk \frac{\rho_p R_{ob} r_p^3}{\rho_G r_p R_{16}^3} \quad (3.46)$$

Чтобы оценить границы применимости критических значений числа Стокса Stk_{cr} для течений с малым радиусом кривизны, образующихся, например, при обтекании тонких волокон и нитей в процессах фильтрации частиц, выразим его через Re_{ob} :

$$Stk = \frac{2}{9} \frac{r_p^2}{2 R_{ob} R_{ob}} \frac{\rho_p u_\infty D_{ob} \rho_G}{\rho_G \eta} = \frac{1}{9} \left(\frac{r_p}{R_{ob}} \right)^2 \frac{\rho_p}{\rho_G} Re_{ob} \quad (3.47)$$

Из (3.47) следует, что при вязком (стоксовском) обтекании ($Re_{ob} \leq 1$) с цилиндром (по [5] $Stk_{cr} = 4,3$) будут сталкиваться частицы с относительным размером $(r_p/R_{ob}) = 0,1$ и более (здесь принято, что относительная плотность частиц $\rho_p/\rho_G = 2000$). Полученный вывод подтверждается известным фактом, что в тканых фильтрах, где препятствия можно упрощенно представлять в виде цилиндров – нитей диаметром до $3 \cdot 10^{-4}$ м, в начальный период работы происходит проскок частиц пыли размером менее 15 мкм. Известно также, что фильтры тонкой очистки, диаметр волокон которых составляет обычно менее 10^{-5} м, имеют проникающий диаметр частиц порядка $0,2 \cdot 10^{-6}$ м. Итак, практически подтверждается, что при вязком обтекании

значение числа Stk_{cr} адекватно соответствует эффективности фильтрации при $R_{ob} > 10^{-4}$ м, и согласуется с ней при $R_{ob} < 0,5 \cdot 10^{-5}$ м. Увеличив Re_{ob} на порядок и ориентировочно считая еще $Stk_{cr} \approx 4,3$, получим $(r_p/R_{ob}) = 0,03$. Тогда из (3.47) следует, что мимо препятствия с $R_{ob} = 10^{-4}$ м может происходить проскок частиц размером не крупнее 3 мкм. Ввиду отсутствия для режима обтекания с $Re_{ob} \approx 1-10$ надежных опытных данных по значению Stk_{cr} можно считать, что он дает совпадение с точностью до порядка величины.

Для потенциального режима $Stk_{cr} \approx 1/8$ ([43]). В соответствии с (3.47), при $Re_{ob} \geq 1000$ с цилиндром должны были бы сталкиваться частицы с размером $r_p \leq 0,0005 R_{ob}$. Тогда на волокнах диаметром порядка 10^{-5} м можно было бы осуществлять инерционное осаждение элементов размером 5 нм и менее, т.е. наночастиц и крупных молекул, что на практике не реализуется. Следовательно, параметр Stk_{cr} при $Re_{ob} \leq 1$ точно характеризует процесс инерционного осаждения частиц на препятствиях с $R_{ob} > 10^{-4}$ м, и приблизительно – на препятствиях с $R_{ob} < 0,5 \cdot 10^{-5}$ м. При обтекании препятствий с $R_{ob} < 6,25 \cdot 10^{-4}$ м при $1 < Re_{ob} < 10$ число Stk_{cr} дает ориентировочные, а при $Re_{ob} > 100$ – нереальные результаты. Причины последнего можно видеть в том, что в (3.47) не учитываются отмеченные выше особенности криволинейного движения частицы в обтекающем препятствие потоке.

На основе отмеченных выше корреляционных соотношений между радиусом препятствия R_{ob} и радиусом кривизны базовой линии тока R_{16} в пределах исследованных значений Re_{ob} для препятствий с $R_{ob} > 5 \cdot 10^{-4}$ м и с $R_{ob} \leq 2,5 \cdot 10^{-4}$ м –

$$R_{16r} = 4,402 - 2,48 \cdot 10^{-3} Re_{ob}, \quad (3.48)$$

$$R_{16r} = R_{16}/R_{ob} \approx 1,67, \quad (3.49)$$

из выражения (3.46) получены соотношения между Re_r и Stk для различных режимов обтекания в виде

$$Re_r = (\rho_p/\rho_G) (r_p/R_{ob})^2 J Stk, \quad (3.50)$$

где $J = (4,16/R_{16r})^3$.

В пределах режимов обтекания $1 \leq Re_{ob} \leq 10^2$ значения параметра J для препятствий с $R_{ob} \leq 2,5 \cdot 10^{-4}$ м приблизительно в 15 раз больше, чем с $R_{ob} > 5 \cdot 10^{-4}$ м. Кроме того, J зависит от R_{ob} в 3-ей степени. Поэтому показатель эффективности сепарации частиц в форме Re_r становится более чувствительным, чем Stk , к изменению R_{ob} и R_{16} . От числа Стокса параметр Re_r , помимо этого, отличается наличием соотношения $\rho_p (r_p/R_{ob})^2$, благодаря которому

более полно учитывается изменение момента инерции частиц J_p и корректнее описываются течения с малым радиусом кривизны.

Полученные выражения могут быть использованы для уточнения расчетов осаждения частиц при обтекании препятствий с $R_{ob} \leq 6,25 \cdot 10^{-4}$ м. Для этого необходимо вычислить критические значения Re_r , определяющие осаждение частиц соответствующих фракций. К примеру, для фракции со средним радиусом частиц $r_p = 10^{-5}$ м и с плотностью $\rho_p = 2000$ кг/м³ в потоке воздуха плотностью $\rho_G = 1,2$ кг/м³ при обтекании препятствия радиусом $R_{ob} = 2 \cdot 10^{-4}$ м в режиме с $Re_{ob} = 10^3$ критическое значение Re_r , подсчитанное по выражению (3.50), составляет 36,45.

Уточнение расчетов осаждения на тонких препятствиях позволит проводить оптимизацию процессов глубокого осаждения опасных и/или дорогостоящих дисперсных примесей гетерогенных потоков в тонковолокнистых фильтрах с целью повышения эффективности систем тонкой очистки выбросов, содержащих, например, пыль радионуклидных производств.

3.2 Оценки поверхностного взаимодействия частицы пыли и препятствия после касания (зацепления)

Движущаяся частица после касания препятствия может быть задержана (осаждена) по месту контакта только при определенном значении энергии взаимодействия между ними, превосходящем кинетическую энергию частицы. Эта сторона эффективности осаждения при фильтрации пока изучена недостаточно. Одной из основных причин является отсутствие подходов к физическому моделированию фильтрующей структуры пористой среды. Теоретически учесть все возможное разнообразие реальных компоновок нитей и волокон, образующие в них совокупность множества препятствий и каналов, их индивидуальных особенностей, проблематично. Картина прохождения потоков из-за влияния соседних объектов становится значительно сложнее обтекания одиночного препятствия. Пока в теории рассматриваются только стационарные, предельно упрощенные схемы фильтрации и структуры фильтрующих слоев. В основном это модели обтекания одиночного препятствия, в которые вводят поправки на особенности рассматриваемой пористой среды. Чтобы смоделировать нестационарность процесса фильтрации, необходимо учесть изменения характеристик препятствий и каналов из-за накопления на них осажденной пыли. Остановимся подробнее на рассмотрении структуры тканых фильтров. Фильтровальные тканые материалы изготавливают (ткнут) из нитей 1 диаметром в несколько сот микрометров, скручиваемых из волокон 2 диаметром порядка десятков микрометров (рис. 3.17а). Переплетения нитей в тканях из натуральных и искусственных синтетических волокон образуют сетку с размерами ячеек

порядка одной - двух толщин нити. Волокна обычно несколько перекрывают ячейки 3, уменьшая проход между нитями (рис. 3.17б).

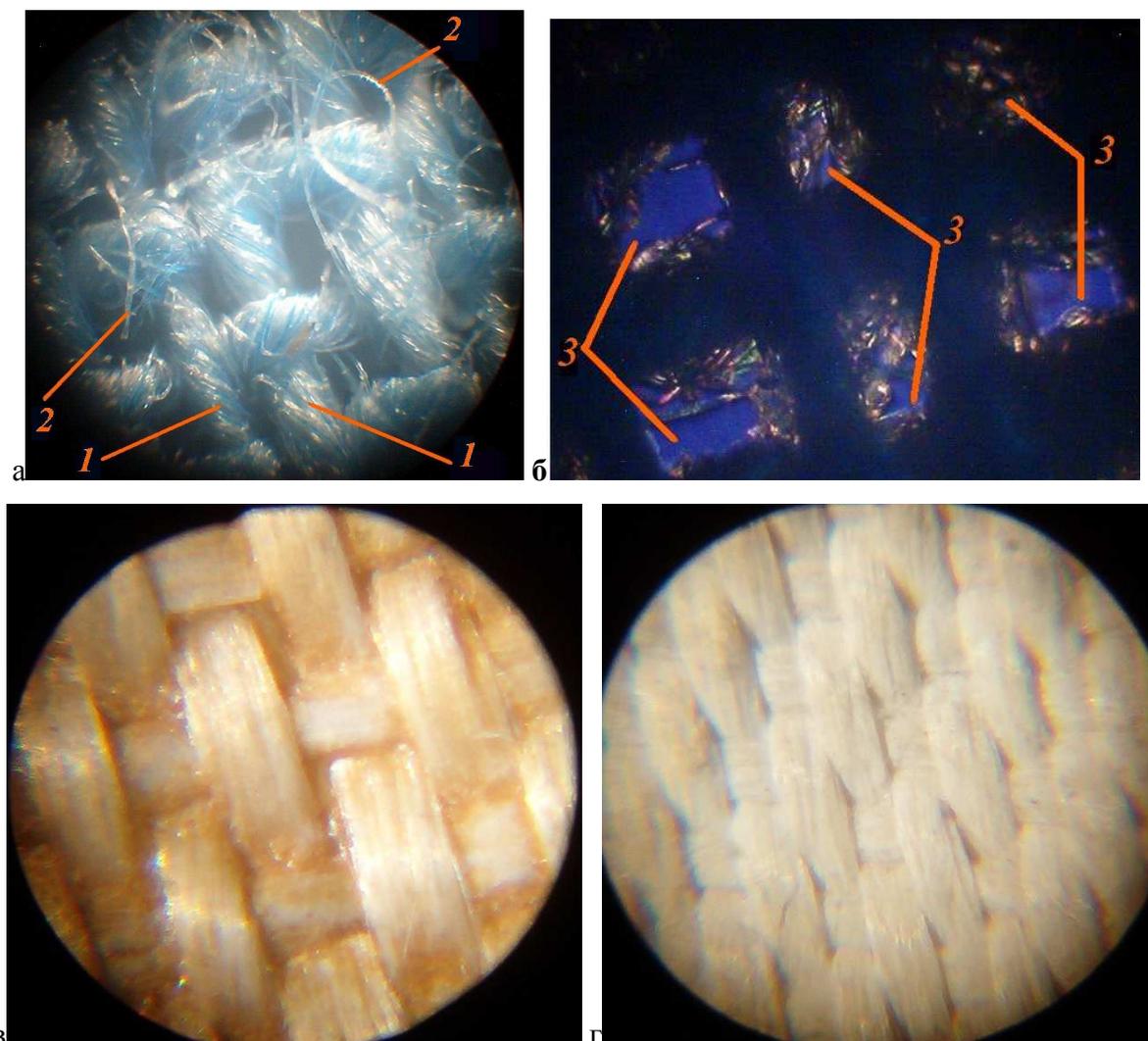


Рис. 3.17 Структура чистого тканого фильтрующего материала: а – лавсан, б – ячейки ткани, перекрытые волокнами, в, г – стеклоткань, полотно и саржа; 1 – нити, 2 – волокна, 3 - ячейки между нитями, частично перекрытые волокнами

Ткани различаются способами переплетения, химической обработки, плотностью, прочностью, массой, воздухопроницаемостью, способами формирования волокон и нитей, другими характеристиками. Структура двух видов стеклоткани различной плотности показана на рис. 3.17в, г.

Новый тканый материал в начальный период фильтрации улавливает лишь частицы, непосредственно контактирующие с нитями и волокнами вследствие зацепления, инерции, диффузии, электростатического притяжения (группы частиц 1 на рис. 3.18а и др.). Большинство частиц проскакивает через ячейки 3. В них из-за отсева могут застревать только очень крупные частицы (частицы 2 на рис. 3.18а).

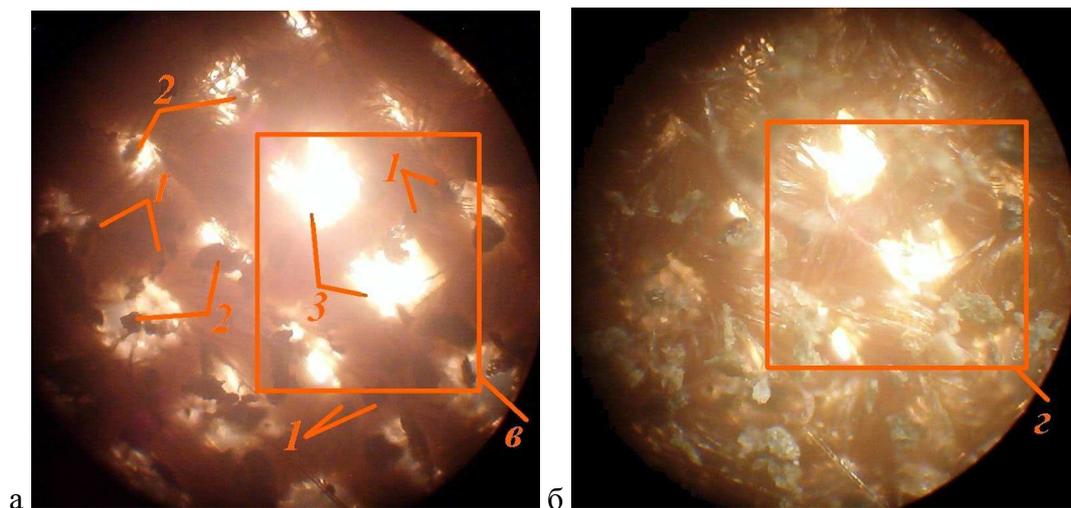


Рис. 3.18 Фильтрация пыли тканым материалом. Пыль растительного происхождения крупная, неслипающаяся: а – начальный период, б - образование автослоя, в, г – формирование пылевых мостиков, фрагменты; 1 - частицы, осевшие при непосредственном контакте с нитями и волокнами ворса; 2 – частицы, застрявшие в ячейках; 3 – свободные ячейки

Через некоторое время ячейки начинают покрываться частицами пыли. Если просвет в перекрываемой ячейке большой, то необходимо, чтобы на ее краях имелись опорные элементы – осевшие частицы пыли или волокна, выходящие в межниточное пространство (4, рис. рис. 3.18). Мелкие частицы, зацепляясь за опорные элементы и друг за друга, составляют мостики (рис. 3.18б), хаотично перекрывающие свободное сечение ячейки. Затем над ними нарастают последующие слои (группы частиц 4, 5, 6 на рис. 3.19а, б) и на поверхности ткани формируется фильтрующий слой из пыли (автослой), который в дальнейшем и улавливает пыль из обрабатываемого выброса.

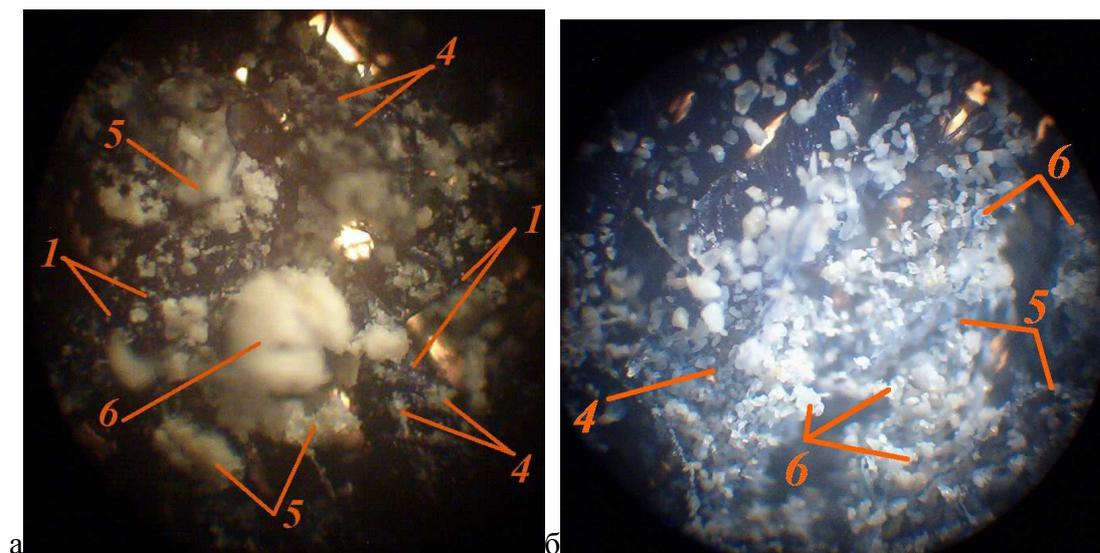


Рис. 3.19. Фильтрация пыли тканью из синтетического волокна (лавсан), образование фильтрующего автослоя: а – пыль мелкая слипающаяся (каолин), $\delta < 10$ мкм; б – пыль неслипающаяся (шамот), $\delta < 63$ мкм; 1 – частицы, осевшие при непосредственном контакте с нитями и волокнами (первичный слой); 4 – вторичный слой; 5, 6 – последующие слои

Интенсивность и плотность перекрытия ячеек и образования автослоя зависит от начальной запыленности и параметров выбросов, структуры и состояния ткани, а также от всех свойств пыли - дисперсного состава, слипаемости, морфологии и т.д. Общим же в процессе фильтрации пыли практически всеми тканевыми материалами является то, что они служат только основой для создания автослоя - фильтрующей пористой среды, состоящей из самой пыли. Если концентрация пыли в выбросах невысока, то начальный период может оказаться довольно продолжительным. По мере работы плотность слоя пыли увеличивается (что можно проследить по фотоснимкам на рис. 3.19), и сопротивление фильтра растет. Со временем клетки могут быть настолько плотно перекрыты пылевыми мостиками, что из-за высокого перепада давления на фильтре пыль начнет загоняться в поры между нитями. Регенерация должна проводиться до наступления такой ситуации. При регенерациях ткани подвергаются механическим воздействиям и частично разрушаются. Нити тканых материалов может разрушать также истирающее, режущее, колющее действие частиц пыли, температурно-влажностное и химическое воздействие очищаемых выбросов. При увлажнении в процессе работы у нитей ослабевает скрутка волокон, изменяется их толщина и воздухопроницаемость, и межниточное пространство в процессе работы становится меньше.

Расчетные способы определения степени очистки или оптимальных параметров работы тканевых фильтров отсутствуют. Параметры осаждения пыли в них определяются опытным путем и указываются заводами - изготовителями в паспортах фильтрующих аппаратов. Обычно степень очистки промышленных выбросов от полидисперсных взвешенных частиц с $D_m > 2 \dots 5$ мкм превышает 99%, а максимальный проникающий диаметр частиц не превосходит 0,5 мкм. На практике фильтры с тканевыми материалами подбирают по производственным аналогам. Для создания аналитической модели фильтрации необходимо определить основной механизм, ответственный за эффективность задержания частиц в пористом слое с учетом действия автослоя, нитей и волокон. С этой целью остановимся вначале на одной из отмеченных выше проблем – сопоставлении энергии взаимодействия между элементами поверхности волокна и частицы после контакта, с кинетической энергией движущейся частицы. Для этого используем характеристики действия межмолекулярных сил с учетом полученного в разделе (2.5.2) уточненного решения задачи о нулевых колебаниях гармонических осцилляторов, и характеристики действия частицы в потоке, полученные в разделе (3.1.4).

3.2.1 Учет вандерваальсового взаимодействия при касании препятствия взвешенной в потоке частицей золы

Влияние процесса удержания препятствием коснувшейся его частицы которого на эффективность осаждения пока изучено недостаточно. Интенсивность перекрытия ячеек и образования автослоя является стохастической величиной. Она зависит от начальной запыленности и параметров выбросов, структуры и состояния ткани, а также от всех свойств пыли - дисперсного состава, слипаемости, морфологии и т.д. Взвешенные в потоке частицы, оседая на препятствия, могут удерживаться только за счет взаимодействия молекул, расположенных на их поверхностях. Следовательно, препятствие (волокно, нить) смогло бы удержать (т.е. уловить и удалить из потока) приблизившиеся частицы, если бы межмолекулярные силы могли противостоять действию потока на частицы. Поэтому представляет теоретический и практический интерес найти параметры частиц и зоны, в границах которой действие межмолекулярных сил может преодолеть действие отрыва потоком частицы от препятствия. По опытным данным действие межмолекулярных сил заметно на расстояниях, не превышающих 10 размеров взаимодействующих атомов, теоретические же ограничения неизвестны. В теории квантовых осцилляторов считается, что дисперсионные силы не направлены и ненасыщаемы ([173]), вследствие чего их действие не ограничено расстоянием и может распространяться на бесконечность. При рассмотрении действия межмолекулярных сил как вандерваальсовых при нулевых колебаниях электронных оболочек атомов – гармонических осцилляторов было найдено, что условием образования максимально прочной связи между двумя атомами является равенство единице безразмерного параметра λ (2.148). Параметр λ можно рассматривать как безразмерное действие вандерваальсовых сил, возникающих при квантовых колебаниях электронных облаков возле центров положительных зарядов

$$a_{vdw} = \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r \omega_0}, \quad (3.51)$$

масштабом которого принят механический момент количества движения данного атома по отношению к взаимодействующему с ним атому

$$a_{mec} = m\omega_0 r^2 \quad (3.52)$$

Круговая частота колебаний электронного облака ω_0^e с размером, соответствующим первой (боровской) орбитали $r_B = 5,2917 \cdot 10^{-11}$ м ([242]):

$$\omega_0^e = \hbar / (m_e r_B^2) = 4,132 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1} \quad (3.53)$$

где $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона; $\hbar = h / (2\pi) = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – квант действия (постоянная Планка).

Для проверки правильности нахождения ω_0^e можно воспользоваться также выражением для энергии электрона несвязанного атома водорода на первом энергетическом уровне, которое является следствием второго постулата Бора:

$$E_{n_1} = \hbar \omega_0 \left(1 - \frac{1}{2} \right) = \frac{\hbar \omega_0}{2}. \quad (3.54)$$

Т.к. полная энергия электрона несвязанного атома:

$$E_n = 13,6058 / n^2 \text{ эВ}, \quad (3.55)$$

то для первого уровня

$$E_{n_1} = 13,6058 \text{ эВ} = 21,7965 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \quad (3.56)$$

и круговая частота колебаний электрона

$$\omega_0^e = 2E_{n_1} / \hbar = 4,1344 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1} \quad (3.57)$$

Частоту колебаний связанных осциллирующих атомов можно оценить по выражению (3.53) с приведенной массой молекулы H_2 , равной, по [243], 0,5039 а.е.м., или $0,83676 \cdot 10^{-27}$ кг:

$\omega_{1,2} = \hbar / (m_e r_B^2) = 4,4983 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$. Полученный результат имеет один порядок с частотой колебаний ω_{H_2} .

При нулевых колебаниях с выполнением условия по выражению (2.148) равновесное расстояние r соответствует взаимодействию между двумя атомами с единичными зарядами $e \cdot e$, т.е. атомами водорода. В качестве приложения этого условия к процессу удержания частицы на препятствии рассмотрим наиболее простой вариант, когда поверхности частицы и препятствия представлены преимущественно атомами водорода. В реальности это будет иметь место при улавливании пыли органического происхождения или органических синтетических материалов на волокнах из натуральных материалов или полимеров (типа лавсан, ПЭТФ, полиэтилен,

полипропилен и др.). К такому варианту относится большинство случаев использования тканых и волокнистых материалов для фильтрационной обработки приточного и отработанного выбросов, а также для обработки некоторых типов выбросов, в том числе с радионуклидной или биологически активной дисперсной частью. В указанных случаях вандерваальсовы силы, удерживающие частицу возле препятствия (волокна, нити), будут возникать в основном вследствие квантовых колебаний электронных облаков атомов водорода, расположенных на их поверхностях.

Для определения равновесного расстояния r между ними квант действия a_{vdw} , совершаемый вандерваальсовыми силами за счет энергии E_{eff} , определяемой по (2.149), можно представить в виде

$$a_{vdw} = \hbar = E_{eff} / \omega_0 \left(1 - \sqrt{2}/2\right) \quad (3.58)$$

Следовательно, равновесное расстояние между ними, соответствующее условию $\lambda=1$, должно быть не более

$$r = \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar\omega_0^e \left(1 - \sqrt{2}/2\right)} = 3,6164 \cdot 10^{-10} \text{ м.} \quad (3.59)$$

Таким образом, зона действия межмолекулярных сил ограничена и определяется квантом действия [244]. Это свидетельствует о соответствии полученного результата современной квантовой теории взаимодействия микрочастиц на уровне атомов и молекул ([245, 174]), а также служит теоретическим подтверждением опытных данных, свидетельствующих об ограниченности зоны действия межмолекулярных сил. Результат (3.59) подтверждается также при решении задачи о взаимодействии атомов водорода как гармонических осцилляторов с использованием уравнения Шрёдингера ([243]).

Полученное значение r полезно и в практическом отношении. Оно показывает, что расстояние, соответствующее максимуму энергии взаимодействия частицы и препятствия, пренебрежимо мало по сравнению с их размерами как макрообъектами. При этом общепринятый критерий захвата частиц в виде макроскопического касания, когда частицы проходят от края препятствия на расстоянии не далее половины своего характерного размера, является необходимым, но недостаточным условием осаждения. Для определения степени осаждения вследствие касания нужно еще оценивать соотношение действий частицы и потока.

Проведенные расчеты позволяют определить энергетические параметры захвата, характеризующие вандерваальсово взаимодействие поверхностных атомов частицы и препятствия при касании. Величина действия для количества вещества, равного 1 кмоль:

$$a_{\mu} = N_A h = 6,022 \cdot 10^{26} \cdot 6,625 \cdot 10^{-34} = 3,99 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} \cdot \text{с} \quad (3.60)$$

По значению числа Re_r для вращающегося (криволинейного) двухфазного потока (2.65) рассчитана величина действия a_{rot} : потока с $u_0 = 0,03 \dots 30$ м/с на частицы диаметром $(0,5 \dots 200) \cdot 10^{-6}$ м, $a_{rot} = 22,4 Re_r \cdot \eta$ Дж·с, и ее безразмерный вид A_p^{rot} как отношение к величине a_{μ} , найденной по (3.60). При помощи параметра A_p^{rot} с достаточной для практических целей точностью прогнозируется возможность удержания частиц на препятствиях различного размера при разной начальной скорости потока.

Значения Re_p , Stk и Re_r , рассчитанные для частиц диаметром $(0,5 \dots 200) \cdot 10^{-6}$ мкм при скорости невозмущенного потока $0,03 \dots 30$ м/с, приведены в приложении П4. Они показывают, что действия в потоке частиц размером более 5 мкм, определенные как $Re_p \cdot \eta$, $Stk \cdot \eta$ и $Re_r \cdot \eta$, превосходят величину действия межмолекулярных сил. Значения безразмерных действий A_G , A_{Stk} и A_p^{rot} , рассчитанные соответственно по значениям a_G , a_{Stk} и a_p^{rot} для частиц диаметром $(0,5 \dots 500) \cdot 10^{-6}$ м при скорости невозмущенного потока $0,03 \dots 30$ м/с, $\rho_G = 1,225$ кг/м³; $\eta = 17,894 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $\rho_p = 2000$ кг/м³; приведены в таблицах: таблица 3.2...

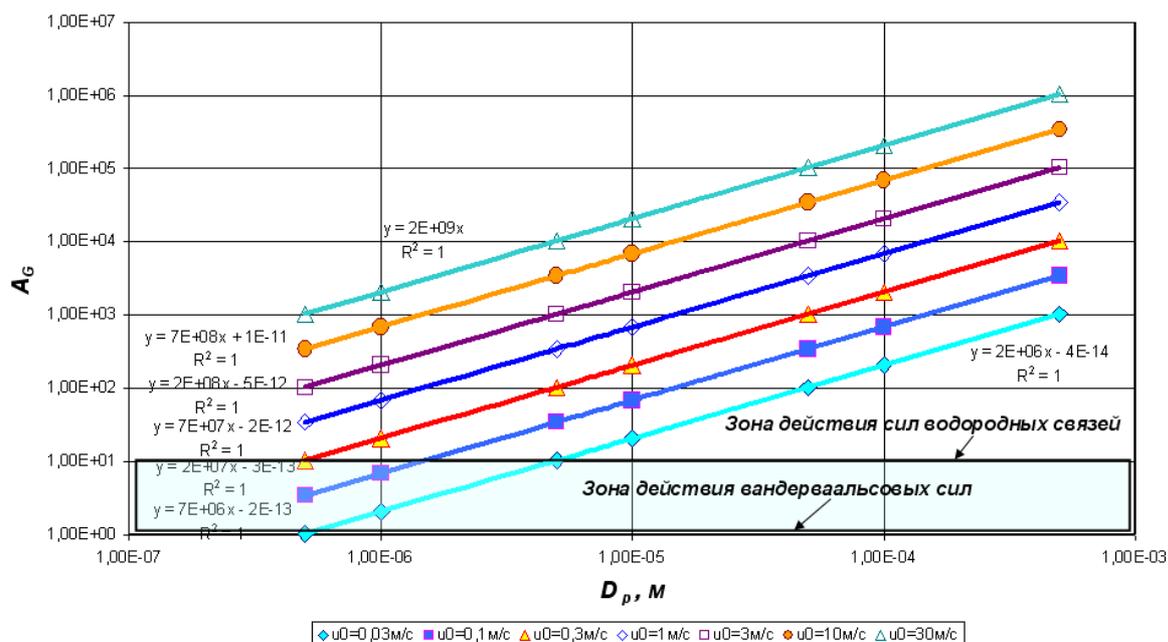
таблица 3.10; и на рисунках: рис. 3.20... рис. 3.28.

$$A_G = a_G / a_{\mu} = 44,8 u_0 \cdot r_p \cdot \rho_G / (3,99 \cdot 10^{-7}) \quad (3.61)$$

$$A_{Stk} = a_{Stk} / a_{\mu} = 44,8 u_0 \cdot r_p^2 \cdot \rho_G / (9 R_{ob} \cdot 3,99 \cdot 10^{-7}) \quad (3.62)$$

Таблица 3.2 Значения безразмерных действий A_G

D_p , м	0.03	0.1	0.3	u_0 , м/с	1	3	10	30
5.00E-07	1.03E+00	3.44E+00	1.03E+01	3.44E+01	1.03E+02	3.44E+02	1.03E+03	
1.00E-06	2.06E+00	6.88E+00	2.06E+01	6.88E+01	2.06E+02	6.88E+02	2.06E+03	
5.00E-06	1.03E+01	3.44E+01	1.03E+02	3.44E+02	1.03E+03	3.44E+03	1.03E+04	
1.00E-05	2.06E+01	6.88E+01	2.06E+02	6.88E+02	2.06E+03	6.88E+03	2.06E+04	
5.00E-05	1.03E+02	3.44E+02	1.03E+03	3.44E+03	1.03E+04	3.44E+04	1.03E+05	
1.00E-04	2.06E+02	6.88E+02	2.06E+03	6.88E+03	2.06E+04	6.88E+04	2.06E+05	
5.00E-04	1.03E+03	3.44E+03	1.03E+04	3.44E+04	1.03E+05	3.44E+05	1.03E+06	

Рис. 3.20. Значения безразмерных действий A_G Таблица 3.3 Значения безразмерных действий A_{Stk} при $R_{ob}=100\mu\text{мкм}$

$r_p, \text{ м}$	$u_0, \text{ м/с}$						
	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
2.50E-07	4.68E-01	1.56E+00	4.68E+00	1.56E+01	4.68E+01	1.56E+02	4.68E+02
5.00E-07	1.87E+00	6.24E+00	1.87E+01	6.24E+01	1.87E+02	6.24E+02	1.87E+03
2.50E-06	4.68E+01	1.56E+02	4.68E+02	1.56E+03	4.68E+03	1.56E+04	4.68E+04
5.00E-06	1.87E+02	6.24E+02	1.87E+03	6.24E+03	1.87E+04	6.24E+04	1.87E+05
2.50E-05	4.68E+03	1.56E+04	4.68E+04	1.56E+05	4.68E+05	1.56E+06	4.68E+06
5.00E-05	1.87E+04	6.24E+04	1.87E+05	6.24E+05	1.87E+06	6.24E+06	1.87E+07
2.50E-04	4.68E+05	1.56E+06	4.68E+06	1.56E+07	4.68E+07	1.56E+08	4.68E+08

Таблица 3.4. Значения безразмерных действий A_{Stk} при $R_{ob}=200\mu\text{мкм}$

$r_p, \text{ м}$	$u_0, \text{ м/с}$						
	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
2.50E-07	2.34E-01	7.80E-01	2.34E+00	7.80E+00	2.34E+01	7.80E+01	2.34E+02
5.00E-07	9.36E-01	3.12E+00	9.36E+00	3.12E+01	9.36E+01	3.12E+02	9.36E+02
2.50E-06	2.34E+01	7.80E+01	2.34E+02	7.80E+02	2.34E+03	7.80E+03	2.34E+04
5.00E-06	9.36E+01	3.12E+02	9.36E+02	3.12E+03	9.36E+03	3.12E+04	9.36E+04
2.50E-05	2.34E+03	7.80E+03	2.34E+04	7.80E+04	2.34E+05	7.80E+05	2.34E+06
5.00E-05	9.36E+03	3.12E+04	9.36E+04	3.12E+05	9.36E+05	3.12E+06	9.36E+06
2.50E-04	2.34E+05	7.80E+05	2.34E+06	7.80E+06	2.34E+07	7.80E+07	2.34E+08

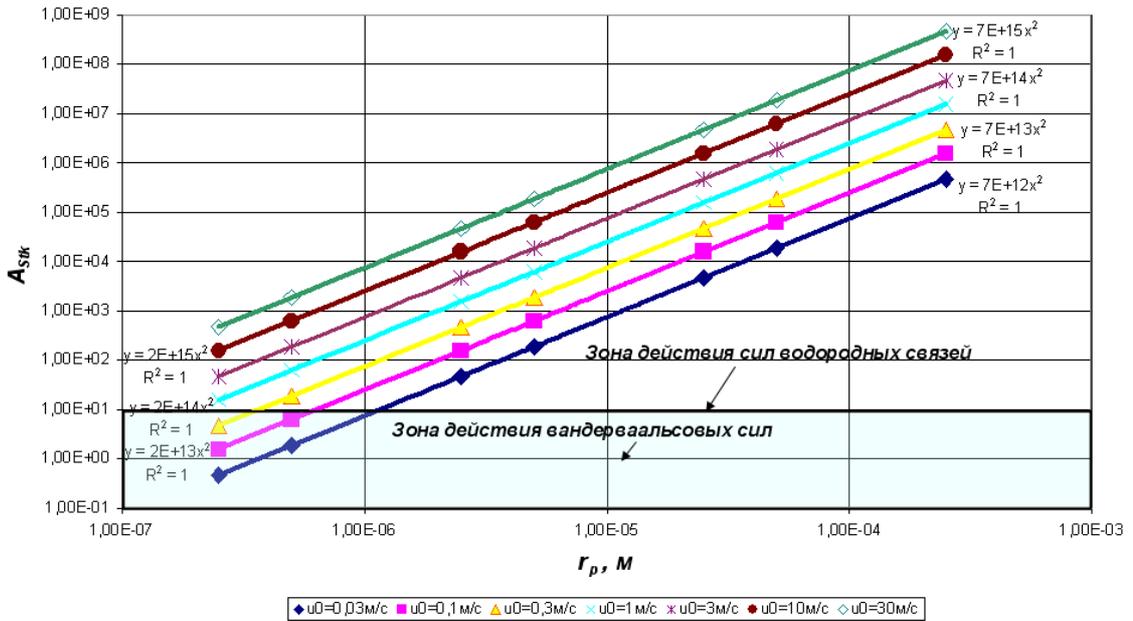


Рис.3.21. Значения безразмерных действий A_{Stk} при $R_{ob}=100\mu\text{м}$

Таблица 3.5. Значения безразмерных действий A_{Stk} при $R_{ob}=500\mu\text{м}$

r_p, M	$u_0, \text{м/с}$						
	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
$2.50E-07$	$9.36E-02$	$3.12E-01$	$9.36E-01$	$3.12E+00$	$9.36E+00$	$3.12E+01$	$9.36E+01$
$5.00E-07$	$3.74E-01$	$1.25E+00$	$3.74E+00$	$1.25E+01$	$3.74E+01$	$1.25E+02$	$3.74E+02$
$2.50E-06$	$9.36E+00$	$3.12E+01$	$9.36E+01$	$3.12E+02$	$9.36E+02$	$3.12E+03$	$9.36E+03$
$5.00E-06$	$3.74E+01$	$1.25E+02$	$3.74E+02$	$1.25E+03$	$3.74E+03$	$1.25E+04$	$3.74E+04$
$2.50E-05$	$9.36E+02$	$3.12E+03$	$9.36E+03$	$3.12E+04$	$9.36E+04$	$3.12E+05$	$9.36E+05$
$5.00E-05$	$3.74E+03$	$1.25E+04$	$3.74E+04$	$1.25E+05$	$3.74E+05$	$1.25E+06$	$3.74E+06$
$2.50E-04$	$9.36E+04$	$3.12E+05$	$9.36E+05$	$3.12E+06$	$9.36E+06$	$3.12E+07$	$9.36E+07$

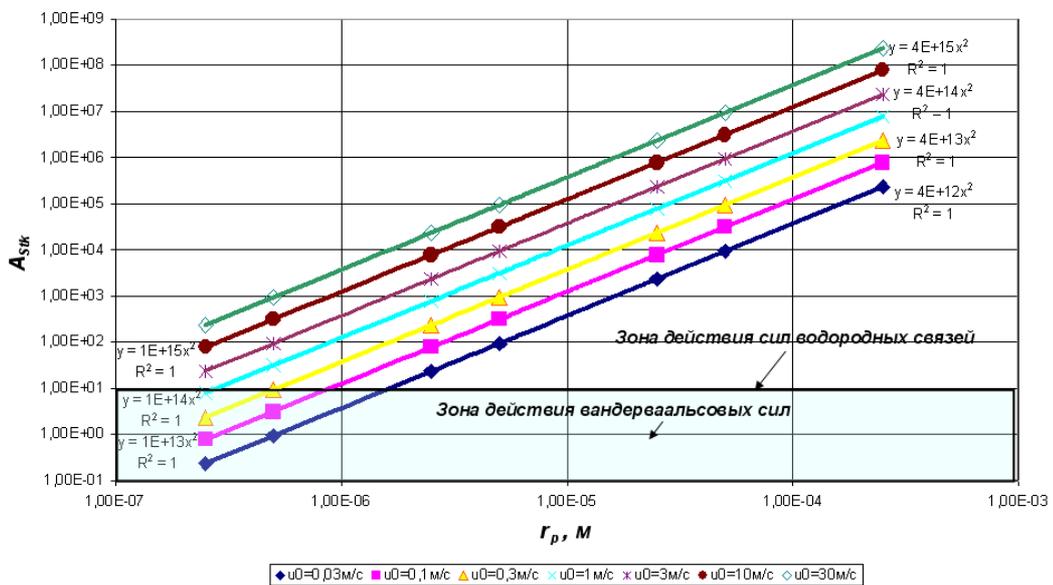


Рис. 3.22 Значения безразмерных действий A_{Stk} при $R_{ob}=200\mu\text{м}$

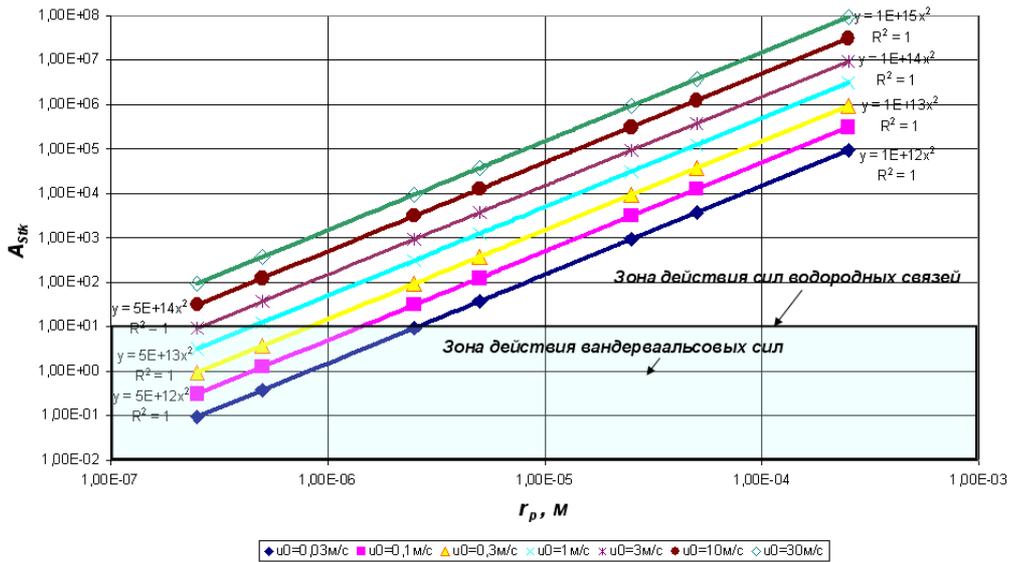


Рис. 3.23 Значения безразмерных действий A_{Stk} при $R_{ob}=500\text{мкм}$

Таблица 3.6. Значения безразмерных действий A_{Stk} при $R_{ob}=1250\text{мкм}$

$r_p, \text{ м}$	$u_0, \text{ м/с}$						
	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
2.50E-07	3.74E-02	1.25E-01	3.74E-01	1.25E+00	3.74E+00	1.25E+01	3.74E+01
5.00E-07	1.50E-01	4.99E-01	1.50E+00	4.99E+00	1.50E+01	4.99E+01	1.50E+02
2.50E-06	3.74E+00	1.25E+01	3.74E+01	1.25E+02	3.74E+02	1.25E+03	3.74E+03
5.00E-06	1.50E+01	4.99E+01	1.50E+02	4.99E+02	1.50E+03	4.99E+03	1.50E+04
2.50E-05	3.74E+02	1.25E+03	3.74E+03	1.25E+04	3.74E+04	1.25E+05	3.74E+05
5.00E-05	1.50E+03	4.99E+03	1.50E+04	4.99E+04	1.50E+05	4.99E+05	1.50E+06
2.50E-04	3.74E+04	1.25E+05	3.74E+05	1.25E+06	3.74E+06	1.25E+07	3.74E+07

Таблица 3.7 Значения безразмерных действий A_p^{rot} при $R_{ob}=100\text{мкм}$

$D_p, \text{ м}$	$u_0, \text{ м/с}$						
	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
5.00E-07	1.02E-01	3.39E-01	1.02E+00	3.39E+00	1.02E+01	3.39E+01	1.02E+02
1.00E-06	1.63E+00	5.43E+00	1.63E+01	5.43E+01	1.63E+02	5.43E+02	1.63E+03
5.00E-06	1.02E+03	3.39E+03	1.02E+04	3.39E+04	1.02E+05	3.39E+05	1.02E+06
1.00E-05	1.63E+04	5.43E+04	1.63E+05	5.43E+05	1.63E+06	5.43E+06	1.63E+07
5.00E-05	1.02E+07	3.39E+07	1.02E+08	3.39E+08	1.02E+09	3.39E+09	1.02E+10
1.00E-04	1.63E+08	5.43E+08	1.63E+09	5.43E+09	1.63E+10	5.43E+10	1.63E+11
5.00E-04	1.02E+11	3.39E+11	1.02E+12	3.39E+12	1.02E+13	3.39E+13	1.02E+14

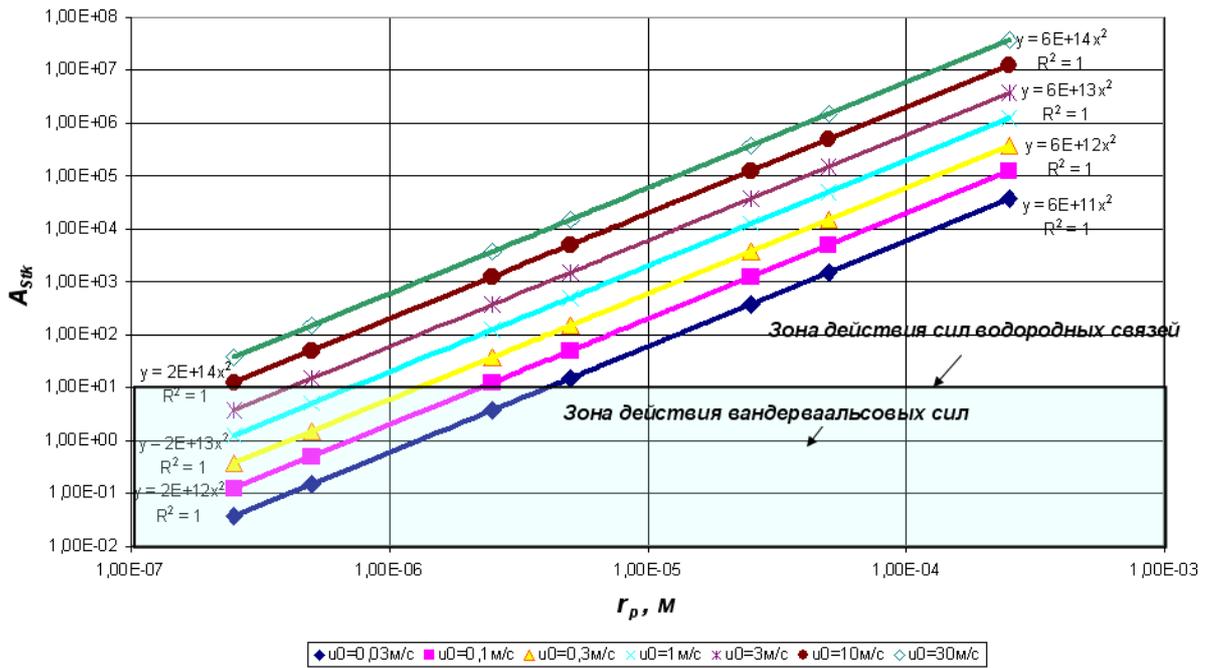


Рис. 3.24 Значения безразмерных действий A_{Stk} при $R_{ob}=1250\mu\text{км}$

$$A_p^{rot} = a_{rot}/a_{\mu} = 6,637u_0\rho_p^2 D_p^4 / (3,99 \cdot 10^{-7} \rho_G R_{ob}). \quad (3.63)$$

Таблица 3.8 Значения безразмерных действий A_p^{rot} при $R_{ob}=200\mu\text{км}$

$D_p, \text{ м}$	$u_0, \text{ м/с}$						
	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
5.00E-07	1.27E-02	4.24E-02	1.27E-01	4.24E-01	1.27E+00	4.24E+00	1.27E+01
1.00E-06	2.04E-01	6.79E-01	2.04E+00	6.79E+00	2.04E+01	6.79E+01	2.04E+02
5.00E-06	1.27E+02	4.24E+02	1.27E+03	4.24E+03	1.27E+04	4.24E+04	1.27E+05
1.00E-05	2.04E+03	6.79E+03	2.04E+04	6.79E+04	2.04E+05	6.79E+05	2.04E+06
5.00E-05	1.27E+06	4.24E+06	1.27E+07	4.24E+07	1.27E+08	4.24E+08	1.27E+09
1.00E-04	2.04E+07	6.79E+07	2.04E+08	6.79E+08	2.04E+09	6.79E+09	2.04E+10
5.00E-04	1.27E+10	4.24E+10	1.27E+11	4.24E+11	1.27E+12	4.24E+12	1.27E+13

Таблица 3.9. Значения безразмерных действий A_p^{rot} при $R_{ob}=500\mu\text{км}$

$D_p, \text{ м}$	$u_0, \text{ м/с}$						
	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
5.00E-07	8.15E-04	2.72E-03	8.15E-03	2.72E-02	8.15E-02	2.72E-01	8.15E-01
1.00E-06	1.30E-02	4.35E-02	1.30E-01	4.35E-01	1.30E+00	4.35E+00	1.30E+01
5.00E-06	8.15E+00	2.72E+01	8.15E+01	2.72E+02	8.15E+02	2.72E+03	8.15E+03
1.00E-05	1.30E+02	4.35E+02	1.30E+03	4.35E+03	1.30E+04	4.35E+04	1.30E+05
5.00E-05	8.15E+04	2.72E+05	8.15E+05	2.72E+06	8.15E+06	2.72E+07	8.15E+07
1.00E-04	1.30E+06	4.35E+06	1.30E+07	4.35E+07	1.30E+08	4.35E+08	1.30E+09
5.00E-04	8.15E+08	2.72E+09	8.15E+09	2.72E+10	8.15E+10	2.72E+11	8.15E+11

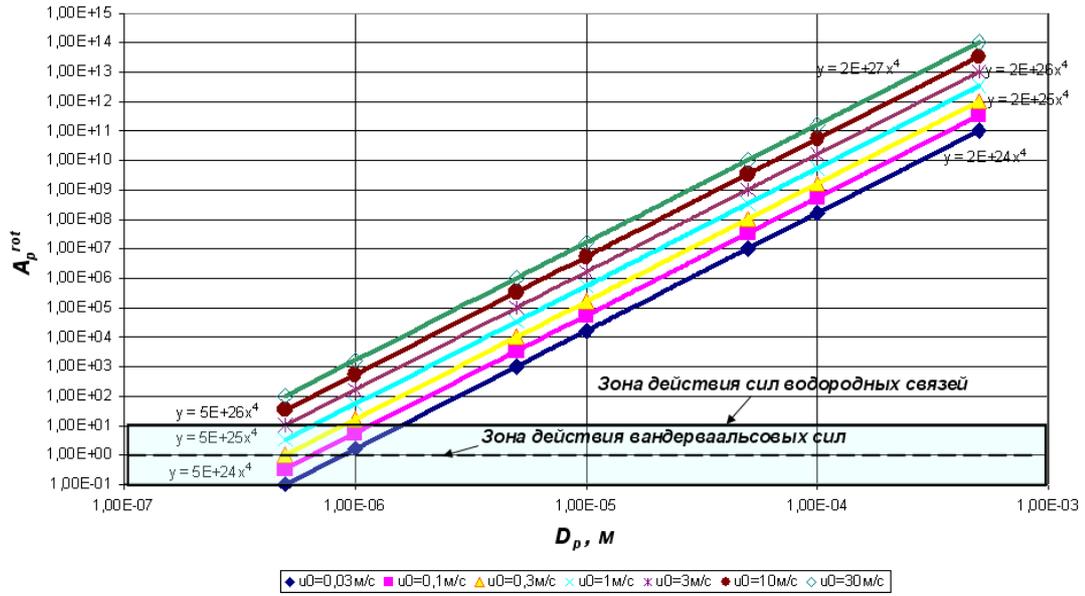


Рис. 3.25 Значения безразмерных действий A_p^{rot} при $R_{ob}=100\mu\text{км}$

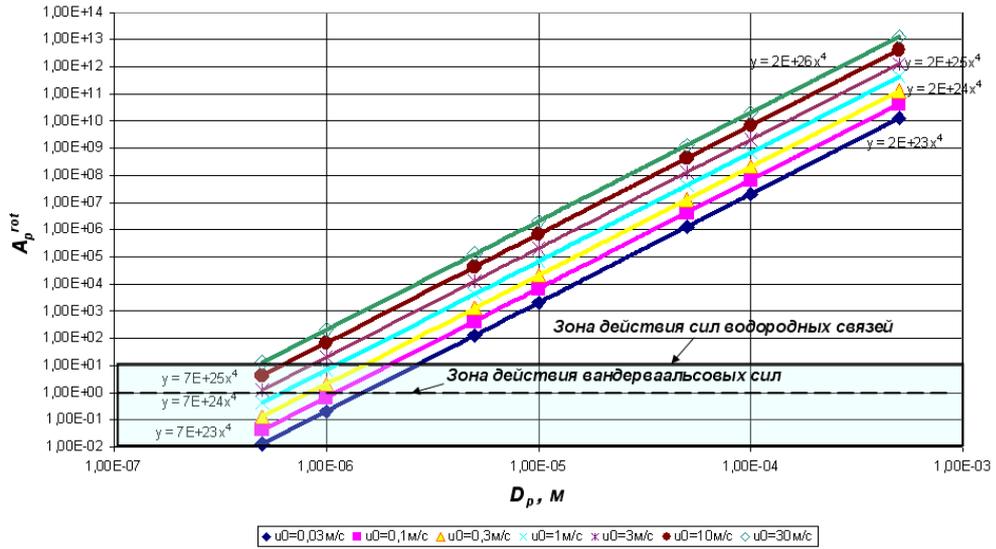


Рис. 3.26 Значения безразмерных действий A_p^{rot} при $R_{ob} = 200\mu\text{км}$

Таблица 3.10. Значения безразмерных действий A_p^{rot} при $R_{ob}=1250\mu\text{км}$

$D_p, \text{ м}$	$u_0, \text{ м/с}$						
	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
5.00E-07	5.21E-05	1.74E-04	5.21E-04	1.74E-03	5.21E-03	1.74E-02	5.21E-02
1.00E-06	8.34E-04	2.78E-03	8.34E-03	2.78E-02	8.34E-02	2.78E-01	8.34E-01
5.00E-06	5.21E-01	1.74E+00	5.21E+00	1.74E+01	5.21E+01	1.74E+02	5.21E+02
1.00E-05	8.34E+00	2.78E+01	8.34E+01	2.78E+02	8.34E+02	2.78E+03	8.34E+03
5.00E-05	5.21E+03	1.74E+04	5.21E+04	1.74E+05	5.21E+05	1.74E+06	5.21E+06
1.00E-04	8.34E+04	2.78E+05	8.34E+05	2.78E+06	8.34E+06	2.78E+07	8.34E+07
5.00E-04	5.21E+07	1.74E+08	5.21E+08	1.74E+09	5.21E+09	1.74E+10	5.21E+10

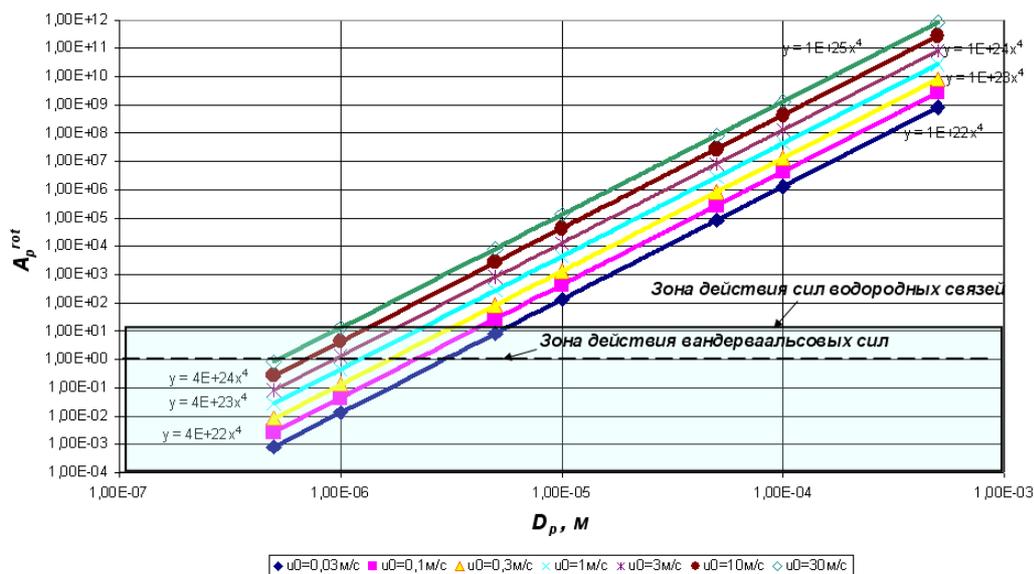


Рис. 3.27 Значения безразмерных действий A_p^{rot} при $R_{ob} = 500 \mu\text{мкм}$

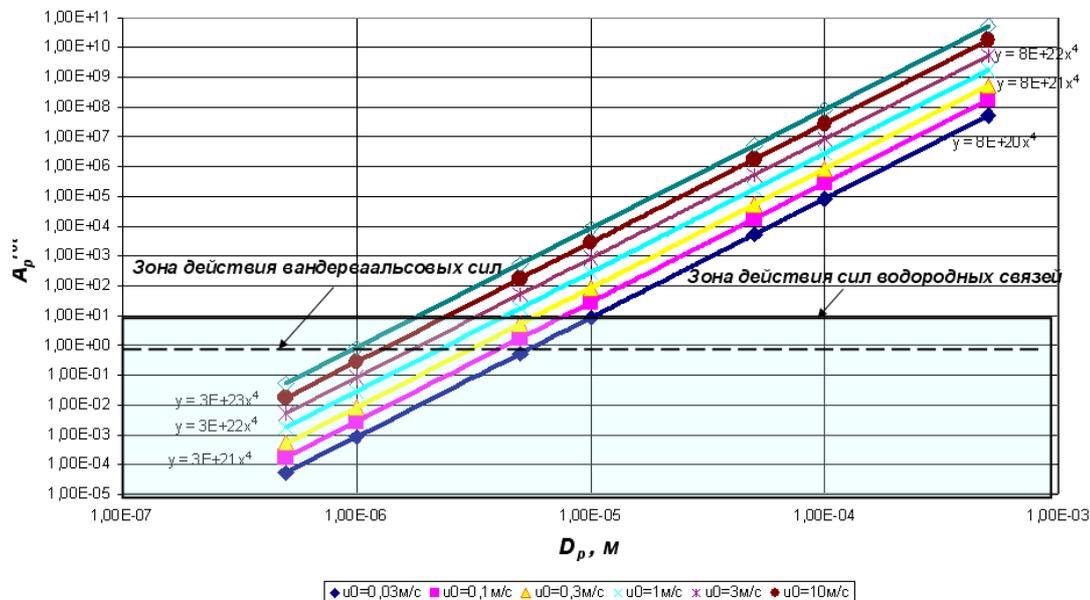


Рис. 3.28 Значения безразмерных действий A_p^{rot} при $R_{ob} = 1250 \mu\text{мкм}$

Таким образом, удержание после касания волокон диаметром 200 мкм и менее основной доли частиц обрабатываемого выбросов, имеющих размер от 5 мкм и выше, может происходить только при существенном вкладе других составляющих, кроме вандерваальсовых сил. Однако вклады магнитных и капиллярных сил непостоянны и специфичны, электрических – существенны при наличии внешнего электрического поля сил, а при его отсутствии не превосходят действия вандерваальсовых сил и могут сказаться только на частицах размером менее 5 мкм. Вклады классических электрических сил, а во влажной среде – капиллярных, непостоянны. Действие электрических сил при отсутствии внешнего электрического поля не превосходит действия вандерваальсовых сил и может сказаться только на частицах размером

менее 5 мкм. Следовательно, в нормальных условиях основными силами, которые могут удерживать частицу после касания на препятствии, остаются вандерваальсовы силы и силы, возникающие при образовании водородных связей, если таковые могут возникать при взаимодействии частицы с препятствием. Вклад водородных связей наиболее заметен среди остальных, но его также недостаточно для удержания частиц среднего размера (крупнее 5 мкм). При помощи параметра A_p^{rot} с достаточной для практических целей точностью прогнозируется возможность удержания частиц на препятствиях различного размера при разной начальной скорости потока. По данным рис. 3.27, рис. 3.28 можно видеть, что сила водородных связей, на порядок превышающая вандерваальсовы, может удерживать на препятствиях диаметром 500...1250 мкм частицы диаметром не более 10...15 мкм до скорости потока 1 м/с.

Частицы среднего размера не смогут удержаться на препятствии после его касания. Поэтому механизм осаждения загрязнителей в пористых фильтрах для частиц различных размеров оказывается разным. Захват касанием может служить основным фильтрующим эффектом для частиц размером не крупнее 5 мкм, т.к. такие частицы еще могут быть удержаны после касания препятствия за счет вандерваальсовых сил и силы водородных связей. На препятствиях размером 100...1250 мкм до скоростей потока 1 м/с расчеты для частиц такого размера могут проводиться без учета влияния удержания на эффективность фильтрации.

Из полученных данных также следует, что частицы размером крупнее 5 мкм не удержатся на препятствии после его касания не только за счет вандерваальсовых сил и силы водородных связей, но и каких-либо других сил, которые предположительно могли бы действовать между частицей и препятствием в нормальных условиях. Как следует из графика (рис. 3.26), для удержания на препятствии размером 200 мкм частиц основного среднего размера промышленной пыли (10...30 мкм) требуется высокопотенциальная энергия, превосходящая по действию вандерваальсово взаимодействие на 5 порядков. Энергия химической связи превосходит энергию межмолекулярной связи на ~3...4 порядка. Поэтому частицы размером 10...30 мкм и крупнее не смогут удержаться на препятствии даже при условии образования хемосорбционной связи, что может осуществляться при использовании для фильтрации материалов из ионообменных волокон.

Таким образом, для частиц размером крупнее 5 мкм захват касанием не является основным процессом, обеспечивающим эффективность фильтрации. При расчете, конструировании и эксплуатации установок для таких частиц необходимо прежде всего учитывать влияние процесса удержания на эффективность фильтрации. Так, например, следует считать заведомо непригодными для фильтрации устройства с одиночными препятствиями и близкие к ним конструкции, а также расчетные модели фильтров «с малой плотностью

упаковки волокон». Ввиду отсутствия мыслимых высокопотенциальных физических сил и воздействий, которые могут быть между частицей и препятствием в естественных условиях при отсутствии внешних полей, удержание на препятствии частиц промышленной пыли среднего и крупного размера (10...300 мкм) может происходить только за счет ситового эффекта (отсева).

Так как действие вандерваальсовых сил становится существенным при осаждении частиц размером менее 5 мкм, рассмотренные методы расчетов осаждения имеют особое значение и должны учитываться при проектировании и эксплуатации систем очистки (обеззараживания) приточного выбросов, а также радионуклидных, бактериологически активных и подобных производственных вентиляционных выбросов.

3.2.2 Учет влияния упрощений, введенных в задачу о нулевых колебаниях, на корректность ее решения

При решении задачи о нулевых колебаниях допускалось, что расстояния между диполями r значительно превосходят их плечи x . Это позволяет пренебречь в знаменателе уравнения (2.128) слагаемыми с x^2 и x^4 ввиду их малости по сравнению с r^3 . Другие математические упрощения в нашем решении, в отличие от традиционного, не применялись. Расчеты выполненные в предыдущем разделе, показали очевидную недостаточность дисперсионных сил для удержания взвешенных частиц даже субмикронного диапазона на препятствиях диаметром менее 100 мкм. Поэтому необходимо убедиться в том, что этот вывод физически корректен, а не является следствием замены точных математических соотношений приближенными выражениями. Допущение $r \gg x$ может быть верным для физической адсорбции, при условии полного отсутствия химической связи между диполями. Применительно к задаче о нулевых колебаниях это условие уместно, так как рассматривается область температур, близких к абсолютному нулю. Проведем оценочное сравнение полученных в предыдущем разделе равновесных расстояний по порядку величины x . В принципе, амплитуда колебаний электрона у ядра является случайной величиной, которая может принимать значения от 0 до ∞ . Вместе с тем, очевидно, амплитуды слабых колебаний такого диполя должны укладываться в размер r_B . В основном состоянии (соответствующем нулевым колебаниям) размер наиболее вероятной области нахождения электрона у ядра атома водорода не превысит первого боровского радиуса $r_B = 0,53 \cdot 10^{-10}$ м. Его и можно принять за верхнюю границу амплитуды колебаний электрона и протона атома водорода. По [173], энергии вандерваальсовых колебаний соответствует плечо диполя порядка $0,2 \cdot 10^{-10}$ м, что можно принять за базовый размер при определении порядка величины x .

Для оценки физической корректности значения полученного в предыдущем разделе равновесного расстояния r между диполями используем следующие факты. Известно, что внешние электроны соседствующих атомов (ионов) начинают активно взаимодействовать на расстоянии 2...3 электронных облаков между ядрами. Для атомов водорода это расстояние составит:

$$l_H = (4...6)r_B = (2,12...3,18) \cdot 10^{-10} \text{ м.} \quad (3.64)$$

Очевидно, равновесное расстояние r_{vdw} при взаимодействии атомов водорода как квантующихся диполей должно быть в пределах этой величины.

Воспользуемся еще сведениями об энергетике и длине «водородных» молекулярных связей типа $H---F$, $H---O$, $H---N$ в группах молекул, имеющих постоянные (неквантовые) электростатические дипольные моменты, таких как HF , H_2O , NH_3 . По [173], энергия «водородных» связей между молекулами $E_H \approx 20$ кДж/моль, а длина связи, определенная по расстоянию между их электроотрицательными атомами, $l = (1,6...1,9) \cdot 10^{-10}$ м. Те же авторы оценивают энергию вандерваальсовых сил $E_{vdw} \approx 4$ кДж/моль. По [245] E_H может составлять от 5 до 150 кДж/моль. По [246], для разрыва водородной связи может потребоваться до 100 кДж/моль. Расстояние r_H между ядром атома кислорода одной молекулы и протоном другой молекулы составляет $1,6 \cdot 10^{-10}$ м (Рис. 3.29). Там же энергия дисперсионного взаимодействия оценивается в 1...20 кДж/моль. Итак, согласно цитируемым сведениям, $E_H/E_{vdw} \approx (5...10)$, а $r_H \approx 1,7 \cdot 10^{-10}$ м.

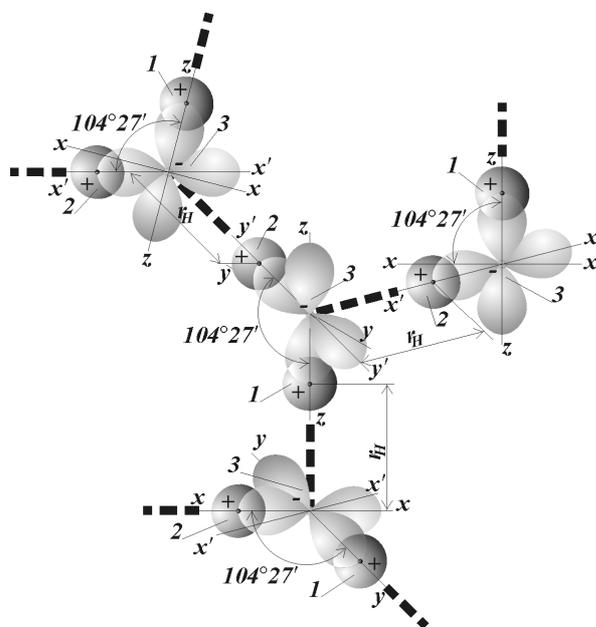


Рис. 3.29 Межмолекулярные водородные связи ассоциированных молекул воды. Области молекул: 1, 2 – электроположительные; 3 – электроотрицательные. Штриховая линия – межмолекулярная водородная связь длиной $r_H = 1,6 \cdot 10^{-10}$ м; x, y, z – ортогональные оси

координат (началом отсчета служат ядра атомов O); x', y' – оси $2p_x, 2p_y$ - орбиталей молекул, отклоненные от ортогональных на $14^\circ 27'$

Если принять в соответствии с наиболее употребительными выражениями для потенциалов – Леннарда-Джонса, Бакингема и др., что энергии межмолекулярных (и «водородных», и вандерваальсовых) взаимодействий обратно пропорциональны шестым степеням расстояний r_H и r_{vdw} ; тогда

$$r_{vdw} = r_H \sqrt[6]{E_H / E_{vdw}} \cong (2,22...2,49) \cdot 10^{-10} \text{ м.} \quad (3.65)$$

Нижний предел r_{vdw} , оцененный по выражению (3.65), соответствует предыдущей оценке расстояния взаимодействия электронов по (3.64). Отметим, что он более чем на порядок превосходит плечо диполя, принятое по [173].

Оценим также значение энергии вандерваальсовых сил, взяв за базовое значение $E_{vdw} \approx 4 \cdot 10^6$ Дж/кмоль по [173]. Найденное нами значение действия на кмоль вещества составляет

$$a_\mu = E_{vdw} \cdot \tau = 3,99 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} \cdot \text{с} \quad (3.66)$$

Отсюда $\tau = 10^{-13}$ с, что совпадает с данными, приводимыми в [243]

Таким образом, найденное нами значение равновесного расстояния и энергии вандерваальсового взаимодействия находится в хорошем соответствии с современными представлениями о межмолекулярных связях. Следовательно, вывод о недостаточности вандерваальсовых сил для удержания на препятствии частиц среднего и крупного размера корректен. Проанализируем вклад других видов взаимодействий и эффектов в захват частиц препятствием.

3.2.3 Вклады различных видов взаимодействий в захват препятствием частиц золы. Зависимость величины вклада от электростатических характеристик золы и пыли

Учет электрической зарядки элементов пористого слоя и аэрозоля

Частицы аэрозоля и/или структурные элементы пористых фильтров (сетки, зерна и др.) часто обладают по тем или иным причинам электрическими зарядами. Поэтому между частицами и препятствиями на пути транспортирующего их потока (фильтровальными элементами) может иметь место электростатическое взаимодействие. Если заряды противоположные, то электростатическое поле возле препятствия увеличивает долю

осаждаемых частиц, внося свой вклад в итоговую эффективность осаждения всеми другими способами. Однако во многих конкретных случаях определение значимости вклада электростатического взаимодействия представляет весьма сложную задачу, т.к. в целом процесс осаждения частиц зависит от большого числа факторов, складывающихся из различных сочетаний физико-химических характеристик потоков, частиц и препятствий. Пока непосредственному расчету поддаются только случаи сочетания крайних (предельных) параметров.

Если заряжены и элементы фильтра, и частицы аэрозоля, то между ними возникает кулоновское взаимодействие. Частицы притягиваются к препятствию с зарядом противоположного знака и осаждаются по его поверхности. В таком случае коэффициент электростатического захвата на единицу длины препятствия по [43] составит

$$\eta_Q = -\frac{Q_V q R}{4\pi\epsilon_0 \eta u r}, \quad (3.67)$$

где Q_V – объемная плотность заряда препятствия (цилиндра), Кл/м³; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; η – коэффициент динамической вязкости среды, Па·с; q – заряд частицы, Кл; R, r – соответственно радиусы препятствия и частицы, м; u – скорость потока, м/с.

Если заряжены только препятствия, то нейтральные частицы поляризуются в их электрическом поле и притягиваются к ним. При этом

$$\eta_Q = \frac{Q\pi r^2 R}{6\epsilon_0 \eta u}, \quad (3.68)$$

где Q – заряд препятствия, Кл.

На практике здесь η_Q может быть ощутимым, если препятствия специально заряжаются от высокопотенциального источника постоянного тока. Но одного этого еще недостаточно даже для однозначности оценки значимости вклада электростатического взаимодействия и результата. В предположении, что оптимальная скорость обтекания препятствия потоком известна и соблюдается, эффективность осаждения η_Q будет зависеть как минимум от электростатических свойств материала улавливаемых частиц [247]. Так например, зола от сжигания углей марки Б1Р Башкирского, Б2 Райчихинского, СС Экибастузского, бурых углей Гусиноозерского месторождений имеет при температуре дымовых газов после парогенератора 130...200°С значение удельного электрического сопротивления УЭС от $2 \cdot 10^{10}$ до $2 \cdot 10^{11}$ Ом·м

[9]. Следовательно, приобретение зарядов частицами золы будут неинтенсивным, и η_Q окажется несущественным. В то же время зола от сжигания каменных углей марок Г, Т Донецкого месторождения, также высокоомная при температуре дымовых газов непосредственно после парогенератора, имеет приемлемое УЭС $< 10^{10}$ Ом·м при температуре ниже 100°C . И наоборот, зола от сжигания углей марки ПЖ Воркутинского месторождения имеет максимум УЭС $= 5 \cdot 10^{10}$ Ом·м при 100°C и практически оптимальное УЭС $= 3,5 \cdot 10^9$ Ом·м при 200°C . Поэтому в первом случае охлаждение дымовых газов перед сепарацией в электростатическом поле у препятствия может дать ощутимый эффект очистки, а во втором – только заметно ухудшить его.

Слишком низкие значения УЭС (порядка 10^5 Ом·м менее – такие, как у угольной пыли при сушке размолотого угля Карагандинского бассейна, Ирша-Бородинского месторождения и др.) также ухудшают степень улавливания взвеси. Индуцированные отображенные заряды создают возле себя соответствующие электрические поля. Оценочно (по [43]) при вязком обтекании препятствия его кулоновское взаимодействие с собственным электрическим полем частицы:

$$\eta_Q = \frac{2K^{0,5}}{(2 - \ln \text{Re})^{0,5}}, \quad (3.69)$$

В (3.69) безразмерный параметр K показывает соотношение сил сопротивления потока и электрических сил:

$$K = \frac{(\epsilon_{rl} - 1)}{(\epsilon_{rl} + 1)} \frac{q^2}{96\pi^2 \epsilon_0 \eta ur R^2}, \quad (3.70)$$

где ϵ_{rl} – электрическая проницаемость материала препятствия относительно вакуума.

Еще более неоднозначна картина взаимодействия нейтральных низкоомных частиц с заряженным волокном. На поверхности частицы, оказавшейся в его поле, будет создан, с какой-то степенью искажения, зеркально отображенный заряд. Это приведет к ускоренному перемещению частицы к волокну за счет кулоновских сил. В непосредственной же близости от препятствия достаточно низкоомная частица может перезарядиться, и ее дальнейшее перемещение будет зависеть от параметра K . Определенно здесь можно только сказать, что при очень маленьких значениях частица достигнет препятствия за счет инерционных сил, а при очень больших – оттолкнется от него за счет кулоновских сил.

В соответствии с [43] рассмотренные виды электростатического захвата в пористых фильтрах могут заметно повлиять на общий процесс осаждения мелких частиц (диаметром порядка нескольких микрометров и менее) при скорости потока u не более 0,1...0,2 м/с.

В конкретных условиях кроме кулоновских сил между частицами могут быть заметны капиллярные силы. По [154], они могут иметь место вследствие конденсации паров, присутствующих в воздухе или другой дисперсионной среде. Капиллярная составляющая силы адгезии, по [154], возникает, если между контактирующими частицами образуются «мостики» капельной жидкости. Считают, что она определяется коэффициентом поверхностного натяжения этой жидкости σ и радиусом частиц R в соответствии с (2.161).

Автор [154] отмечает, что капиллярные силы по порядку величины могут превышать силы Ван дер Ваальса, а при взаимодействии капель и твердых пористых частиц всегда превосходят их. Однако в [248] показано, что капиллярные силы существенны только при адгезии твердых частиц во влажной среде, а при относительной влажности дисперсионной среды $\phi < 80\%$ они практически отсутствуют.

Проведенная оценка позволяет также сделать вывод о том, что удержание на препятствиях малого диаметра (менее 200 мкм) основной доли частиц, имеющей размер от 5 мкм и выше, происходит не только за счет вандерваальсовых сил, но и за счет других составляющих, среди которых заметен вклад водородных связей. Вклад классических электрических сил, а во влажной среде – капиллярных, является как непостоянный. Действие электрических сил при отсутствии внешнего электрического поля не превосходит действия вандерваальсовых сил и может сказаться на частицах размером менее 5 мкм. Во влажной среде действие сил поверхностного натяжения может превосходить вандерваальсовы, однако при нормальной влажности оно отсутствует. Таким образом, в нормальных условиях основными силами, удерживающими частицу после осаждения на препятствии, остаются вандерваальсовы силы и силы, возникающие при образовании водородных связей, если таковые могут иметь место во взаимодействии частицы и препятствия. На основе разработанного в данном разделе параметра A_p^{rot} можно с достаточной для практических целей точностью спрогнозировать возможность удержания частиц на препятствиях различного размера при разной начальной скорости потока. Как следует из приведенных ранее таблиц (таблица 3.7...таблица 3.10) и рис. 3.25...рис. 3.28, сила водородных связей, на порядок превышающая вандерваальсовы, позволяет удерживать на препятствиях диаметром 500...1250 мкм частицы диаметром 10...15 мкм до скорости потока 1 м/с. Проведенный анализ показывает, что частицы среднего размера не смогли бы удержаться на препятствии после его касания. Поэтому механизм осаждения загрязнителей в пористых фильтрах оказывается разным для частиц различных размеров.

Захват касанием может служить основным фильтрующим эффектом для частиц размером не крупнее 5 мкм, т.к. такие частицы могут быть удержаны после касания препятствия за счет вандерваальсовых сил и силы водородных связей. Поэтому на препятствиях размером 100...1250 мкм до скоростей потока 1 м/с расчеты для частиц такого размера могут проводиться без учета влияния процесса удержания на эффективность фильтрации. Проведенный анализ также показывает, что частицы размером крупнее 5 мкм не удержатся на препятствии после его касания ни за счет вандерваальсовых сил и силы водородных связей, ни за счет каких-либо других сил, которые предположительно могли бы действовать между частицей и препятствием в нормальных условиях. В данной работе не рассматривается вопрос использования для фильтрации каких бы то ни было высокопотенциальных внешних полей – электрических, магнитных и т.д. Как следует из таблицы – таблица 3.4, и рис. 3.26, для удержания на препятствии размером 200 мкм частиц основного среднего размера промышленной пыли (10...30 мкм) требуется высокопотенциальная энергия, превосходящая по действию вандерваальсово взаимодействие на 5 порядков. Т.к. энергия химической связи превосходит энергию межмолекулярной связи не более чем на 3...4 порядка, то частицы размером 10...30 мкм не смогут удержаться на препятствии даже при условии образования между ними хемосорбционной связи. Такой вариант может осуществляться при использовании для фильтрации материалов из хемосорбированных ионообменных волокон типа ВИОН. Поэтому для частиц размером крупнее 5 мкм захват касанием не является основным процессом, обеспечивающим эффективность фильтрации. При расчете, конструировании и эксплуатации установок для таких частиц необходимо прежде всего учитывать влияние процесса удержания на эффективность фильтрации. Ввиду отсутствия мыслимых высокопотенциальных физических сил и воздействий, которые могут быть между частицей и препятствием в естественных условиях при отсутствии внешних полей, единственным способом удержания на препятствии частиц промышленной пыли среднего и крупного размера (10...300 мкм) остается ситовой эффект (отсев, классификация). Действие вандерваальсовых сил становится существенным при осаждении частиц размером менее 5 мкм. Поэтому рассмотренные методы расчетов осаждения имеют особое значение и должны учитываться при проектировании и эксплуатации систем очистки (обеззараживания) приточного воздуха, а также радионуклидных, бактериологически активных и подобных выбросов. Для более крупных частиц необходима модель, рассматривающая классификацию в качестве основного эффекта. Создание чисто теоретической модели процесса улавливания дисперсной примеси в пористых фильтрах с целью определения реальной степени проскока на настоящее время проблематично. Далее

будет рассмотрена полуэмпирическая модель с использованием полученных опытных данных по фильтрации некоторых видов пыли, различающихся слипаемостью и медианным диаметром.

3.3 Расчеты высоты начального подъема струи над высоким источником – дымовой трубой ТЭС

Анализ совершенства существующих методов расчета ПДВ (разд.1.2.2) показал, что их теоретической базой является теория рассеивания. К настоящему времени среди широкого круга исследований по этому предмету одним из наиболее полных и совершенных остается подход, который разрабатывался М.Е. Берляндом с сотрудниками [249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258]. Анализ (разд. 2.2) показал, что он основан на фундаментальном принципе равенства действий, и на данный момент необходимости кардинального усовершенствования самого подхода нет. Целесообразно количественное уточнение связи нормируемых величин выброса с ПДК выбрасываемых загрязнителей с использованием современных программ, реализующих методы вычислительной гидроаэродинамики [259]. Далее с этой целью посредством численного моделирования с использованием методов CFD исследовано распространение в атмосфере многокомпонентного неизотермического потока. Определялись: высота подъема примеси ΔH , изменение концентраций компонентов выброса, температуры и вертикальной составляющей скорости струи после выхода из источника. Для численного эксперимента был принят следующий состав выбросов: CO_2 – 12% мас., O_2 – 4% мас., H_2O – 8% мас., N_2 – 76% мас. Скорость потока w_0 на выходе из источника изменялась в пределах от 1 до 10 м/с, скорость ветра u_m – от 2 до 5 м/с. Температура потока на выходе из трубы ($T_0 = 373,15K$) и температура окружающего воздуха ($T_m = 293,15K$) в расчете оставались неизменными. Вследствие незначительного изменения температуры в слое атмосферы, где развивается выходящий поток, учтена сила плавучести только самой струи. Задача решалась в двумерной постановке (2d- модель – длинномерный щелевой источник с шириной щели 2м) и в трехмерной (3d- модель – труба с выходным диаметром 2м).

Рассматривался выброс из труб высотой $H = 80 - 180$ м в атмосферу с равновесной стратификацией. С учетом того, что температура по высоте приземного и пограничного слоя атмосферы, т.е. в слое до 1000 м, где и развивается выходящий из трубы поток, изменяется на 1 К, за исходную модель принято соотношение (2.36). Будут использованы и упрощения по силам плавучести в отношении самой атмосферы, т.е. учтена сила плавучести только самой струи. При этом температура выходящего из трубы потока $t_0 = 373,15K$ и температура окружающего воздуха $t_m = 293,15K$ рассматриваются как постоянные величины.

Согласно с предложением ([134, 54]) считать в состоянии температурной инверсии N пропорциональным энергии турбулентности k турбулентная вязкость N принята пропорциональной плотности кинетической энергии (потенциалу) турбулентности $k = (u'_i u'_i)_m / 2$ (здесь индекс m означает осреднение стохастических пульсационных параметров по времени, i – суммирование по «нему» индексу) и для расчетов в условиях равновесной стратификации. Это предложение, как было установлено ранее, фактически основано на универсальном принципе эквивалентности действий и принципиально не может быть ошибочным. Вместе с тем недостатки и ограничения однопараметрической (k -) модели были отмечены ранее (разд. 3.1.1). Поскольку в рассматриваемой задаче архимедовы силы играют существенную роль, окончательно в расчетах принята двухпараметрическая (k - ε)-модель турбулентности со «стандартными» пристенными функциями ([260, 127]), имеющая широкий выбор надежных эмпирических констант. В этой модели $\varepsilon = \nu (\partial u'_i / \partial x_j)_m^2$ – скорость диссипации k .

В численном эксперименте скорость выхода из трубы w_0 изменялась в пределах от 1 до 10 м/с, скорость ветра u_m – от 2 до 5 м/с. Этот интервал включает значение опасной скорости ветра. Для приведения факторов к безразмерному виду использовались: в качестве характерного размера – диаметр устья трубы $D = 2$ м, в качестве характерной скорости – скорость ветра, близкая к штилю $u_{calm} = 1$ м/с. Результаты расчетов приведены в приложении П5.

Модель, использованная в численном эксперименте, построена в натуральную величину, что позволяет использовать полученные результаты непосредственно, без масштабирования методами теории подобия. Вместе с тем неудобством таких схем является усиленная чувствительность результатов расчетов к адаптации. В характерной области выхода и подъема струи пространственная сетка после построения в предпроцессоре Gambit измельчалась (адаптировалась) не менее трех раз в самой расчетной программе до получения стабильных результатов. Вследствие больших габаритов объектов приемлемое время работы в программе (4...8 часов) достигалось в сантиметровом диапазоне ячеек в зоне распространения струи и дециметровом – в остальной области. Статистика расчетных областей 2d- модели после окончательной адаптации следующая: минимальный и максимальный размеры площадей ячеек, m^2 – от $3,91 \cdot 10^{-4}$ до 13,325.

Геометрия расчетной области 2-мерной задачи показана на рис. 3.30. Размеры расчетной области: высота $A = 800$ м, длина $B = 1000$ м; высота выброса H до 180 м. Рассматриваемая область исследований имеет минимальное и максимальное значение координат, м, по x от $-1,00 \cdot 10^2$ до $2,00 \cdot 10^3$, по y от 0 до $8,00 \cdot 10^2$. Вся расчетная область занимает пространство

объемом $1,68 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. Граничные условия для внешнего обтекающего потока моделировались следующим образом. На левой границе области поставлено условие Velocity Inlet с заданием равномерной скорости от 2 до 5 м/с. На правой границе задается только условие Outflow (вытекания потока из расчетной области). Других условий не ставится, а все граничные параметры потока рассчитываются в программе путем экстраполяции от смежных с границей ячеек.

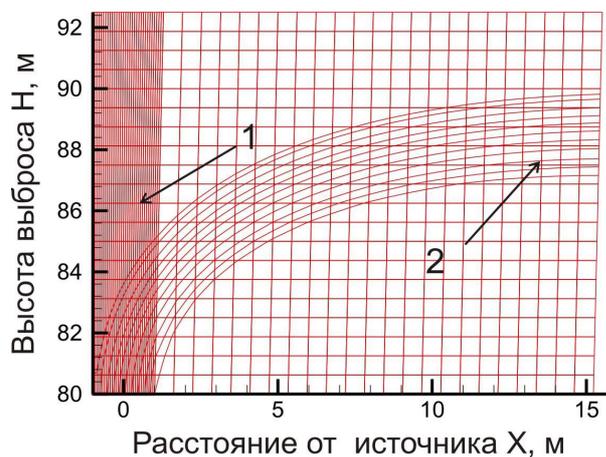


Рис. 3.30 Часть расчетной области 2-мерной задачи у устья выброса. 1 – зона 3-х кратной адаптации, 2 – линии тока струи выброса

Этот способ дает хорошее совпадение с данными физических экспериментов в случаях, подобных рассматриваемому – при моделировании границ, достаточно удаленных от источников искажений потока.

Обработка результатов численных исследований

Для сокращения объема вычислений при проведении численного исследования были использованы методы планирования эксперимента. По результатам исследований проведена проверка воспроизводимости опытов и определены погрешности полученных соотношений.

В качестве основных независимых переменных (факторов) x_1, x_2, x_3 , влияющих на траекторию распространения струи при постоянных значениях температуры окружающей среды и струи на выходе из трубы, приняты: высота выброса струи H м, скорость ее выхода w_0 м/с, скорость ветра u_m м/с, и их безразмерные значения H^r, w_0^r, u_m^r . Поэтому численный эксперимент номинально является трехфакторным. При этом получаемые в результате исследований количественные характеристики, или функции отклика, при различных значениях x_1 и одинаковых факторах x_2, x_3 также отличаются незначительно. Таким образом, фактически проводился полный двухфакторный эксперимент. План такого исследования представлен в

таблице – таблица 3.11. Факторы в матрице планирования варьируются на двух уровнях, соответствующих значениям кодированных переменных -1 и +1.

Таблица 3.11. План полного двухфакторного эксперимента

№ опыта	факторы		функции отклика
	x_1	x_2	y_i
1	-1	-1	y_1
2	-1	+1	y_2
3	+1	-1	y_3
4	+1	+1	y_4

Координаты центра плана вводятся как среднее арифметическое большего $x_{i \max}$ и меньшего $x_{i \min}$ значений факторов в исследуемой области:

$$x_{0i} = \frac{x_{i \max} + x_{i \min}}{2}. \quad (3.71)$$

Интервал варьирования (интервал изменения каждого из факторов) Δx_i составляет:

$$\Delta x_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{2}. \quad (3.72)$$

Кодированные переменные вводятся как

$$X_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i}. \quad (3.73)$$

При приведении факторов к безразмерному виду были приняты: в качестве характерного размера – диаметр устья трубы $D = 2$ м, в качестве характерной скорости – скорость ветра, близкая к штилю $u_{calm} = 1$ м/с. Проведены 2 серии полных двухфакторных экспериментов по факторам x_2, x_3 при неизменном значении x_1 внутри каждой серии. Результаты вычислений представлены в таблице П5.

Проверка воспроизводимости вычислений и погрешности

По результатам исследований проведена проверка воспроизводимости опытов и определены погрешности полученных соотношений. Искомыми функциями отклика являются координаты струй, истекающих из труб ΔH м, x м, или их безразмерные значения $\Delta H^r, x^r$. Функции отклика зависят от факторов: $\Delta H^r(x^r) = F(x_1 \dots x_3)$. В итоге определяется конкретный вид этой зависимости и отклонения от данных, полученных в результате исследований.

Зависимости коэффициентов регрессии от скорости ветра u_m и высоты подъема от скорости выхода струи из трубы $\Delta H=f(w_0)$ приведены в приложении П5. Также определяется значимость коэффициентов регрессии.

Воспроизводимость результатов исследований определялась по сериям параллельных опытов, за которые были приняты вычисления с одинаковыми факторами x_2, x_3 при различных высотах труб. В каждой серии параллельных опытов вычислялось среднее арифметическое значение функции отклика

$$\bar{y}_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_{ji}, \quad (j=1,2,\dots,k), \quad (i=1,2,\dots,K), \quad (3.74)$$

где k – число серий параллельных опытов,

$K=2$ – число параллельных опытов, проведенных при одинаковых условиях.

Далее выполняется оценка дисперсии для каждой серии параллельных опытов

$$s_j^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (y_{ji} - \bar{y}_j)^2. \quad (3.75)$$

Результаты расчетов сведены в таблицу - Таблица 3.12.

Таблица 3.12

Оценка дисперсии

Номер серии опытов	Условия опытов		Результаты опытов ($\Delta H'$)		\bar{y}_j	s_j^2
	u_m^r (x_1)	w_0^r (x_2)	y_{j1}	y_{j2}		
1	3	1	0,42	0,62	0,5150	0,0200
2	5	1	0,29	0,47	0,3750	0,0162
3	5	10	4,99	4,87	4,9250	0,0072

Расчетное значение критерия Кохрена

$$G_c = \frac{\max s_j^2}{\sum_{j=1}^K s_j^2} = \frac{0,02}{0,02 + 0,0162 + 0,0072} = 0,461 \quad (3.76)$$

меньше табличного $G=0,967$, найденного при доверительном уровне $P=0,95$ в зависимости от количества опытов в предварительном эксперименте $N_{pr}=3$, числа серий параллельных опытов

$k=2$ и числа степеней свободы $B_{pr}=k-1=1$ ([261]). Полученное неравенство $G_c < G$ означает, что результаты численных исследований являются воспроизводимыми, а оценки дисперсии – однородными. Однородность оценок позволяет усреднять оценки дисперсий нескольких серий параллельных опытов:

$$s_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j^2 = 0,014; \quad (3.77)$$

Оценка дисперсии среднего значения

$$s_y^2 = s_y^2 / k = 0,007. \quad (3.78)$$

При окончательном количестве опытов в одной серии эксперимента $N=4$ ошибка в определении коэффициентов регрессии составит

$$s_b = \sqrt{s_y^2 / N} = 0,0425 \quad (3.79)$$

Параметр (t - значение) распределения Стьюдента $t = 3,182$ при доверительном уровне $P=0,95$ и количестве степеней свободы $B=N-1=3$ ([262]). Отсюда t - критерий значимости Стьюдента для коэффициентов регрессии

$$s_b t = 0,1353. \quad (3.80)$$

Результаты проверки значимости коэффициентов регрессии приведены в таблице – таблица 3.13

Таблица 3.13

Коэф- фициент	Значение	t- критерий	Оценка значимости
b_0	-0,5139	0,1353	значим
b_1	0,0767	0,1353	незначим
b_2	1,2389	0,1353	значим
b_{12}	-0,1467	0,1353	значим

С учетом значимости коэффициентов регрессии искомая функция для определения высоты подъема струи над источником представляется как:

$$y = b_0 + b_2 * X_2 + b_{12} * X_1 * X_2, \quad (3.81)$$

и окончательно в конкретном виде:

$$\Delta H^r = w_0^r (1,239 - 0,147 u_m^r) - 0,514; \quad (3.82)$$

$$\Delta H = D [w_0^r (1,239 - 0,147 u_m^r) - 0,514], \text{ м.} \quad (3.83)$$

Выполнена проверка адекватности уравнения регрессии. Результаты проверки приведены в таблице – таблица 3.14

Таблица 3.14

Проверка адекватности уравнения регрессии

Функции отклика	Расчетные значения	Действительные значения
y_1	0,52	0,515
y_2	0,38	0,375
y_3	7,70	7,705
y_4	4,92	4,925

Оценка дисперсии адекватности

$$s_{ad}^2 = \frac{1}{N - B} \sum_{j=1}^N (y_j^a - y_j^p)^2 = 2,6 \cdot 10^{-6} \quad (3.84)$$

Оценка дисперсии адекватности дает $s_{ad}^2 = 2,6 \cdot 10^{-6}$, что показывает несущественные отклонения результатов расчета по уравнению регрессии от значений, полученных непосредственно в проведенном эксперименте. Полученное в результате численного исследования на 2d- модели выражение (3.83) по структуре соответствует классическому ([54]) и может использоваться в расчетах атмосферной диффузии выбросов из щелевых источников, а также при их проектировании. На рис. 3.31 в качестве примера приведены результаты расчета на двухмерной модели высоты подъема струи одного из режимов выброса с $w_0=10\text{м/с}$, $u_m=5\text{м/с}$ из щелевого источника высотой $H = 80$ м.

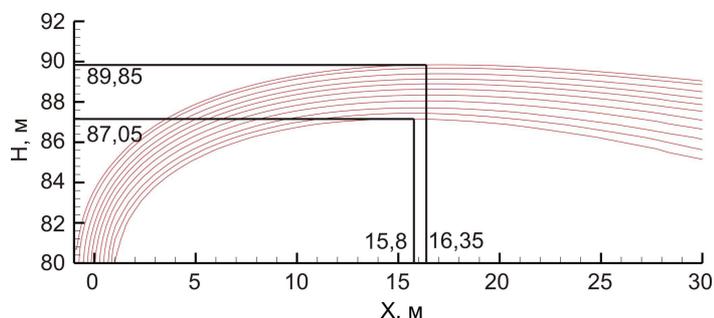


Рис. 3.31. Определение эффективной высоты подъема струи H_e над щелевым источником выброса при $H = 80$ м, $w_0=10\text{м/с}$ и $u_m=5\text{м/с}$

Схемы расчетов и диапазоны параметров, соответствующие стабильности и физической непротиворечивости результатов, отработанные на 2d- модели, использованы при решении трехмерных задач. Они обеспечивают существенную экономию машинного времени. В 3-мерных расчетах значительно возрастает количество ячеек расчетной сетки, что требует соответствующего увеличения вычислительных ресурсов. Задача о распространении выброса из круглой трубы, обдуваемой поперечным потоком, решалась на сетке со следующими параметрами: минимальный и максимальный размеры объемов ячеек, m^3 , от $2,669 \cdot 10^{-3}$ до 68659,92. Граничные условия задавались так же, как и в плоской задаче. Размеры расчетной области представлены на рис. 3.32а. Примеры течения при скорости выхода потока из трубы 10 м/с и скорости ветра 3 и 5 м/с показаны на рис. 3.32б, 4, 5.

Результаты расчетов распространения выброса из источника круглого сечения (рис. 3.32б) показали следующее. В поперечном сечении струя имеет подковообразный профиль, что соответствует реальным профилям обдуваемых струй. Устойчивость расчетов, как и по двумерной задаче, в целом ограничивается областью, в которой скорости w_0 , u_m различаются менее чем на порядок. В таком диапазоне скоростей при неизменном температурном напоре выходящей из источника струи ($\Delta T = T_0 - T_m = 80K$) исходный потенциал распространяющегося потока, зависящий от его скорости и температуры на выходе, достаточно быстро исчерпывается.

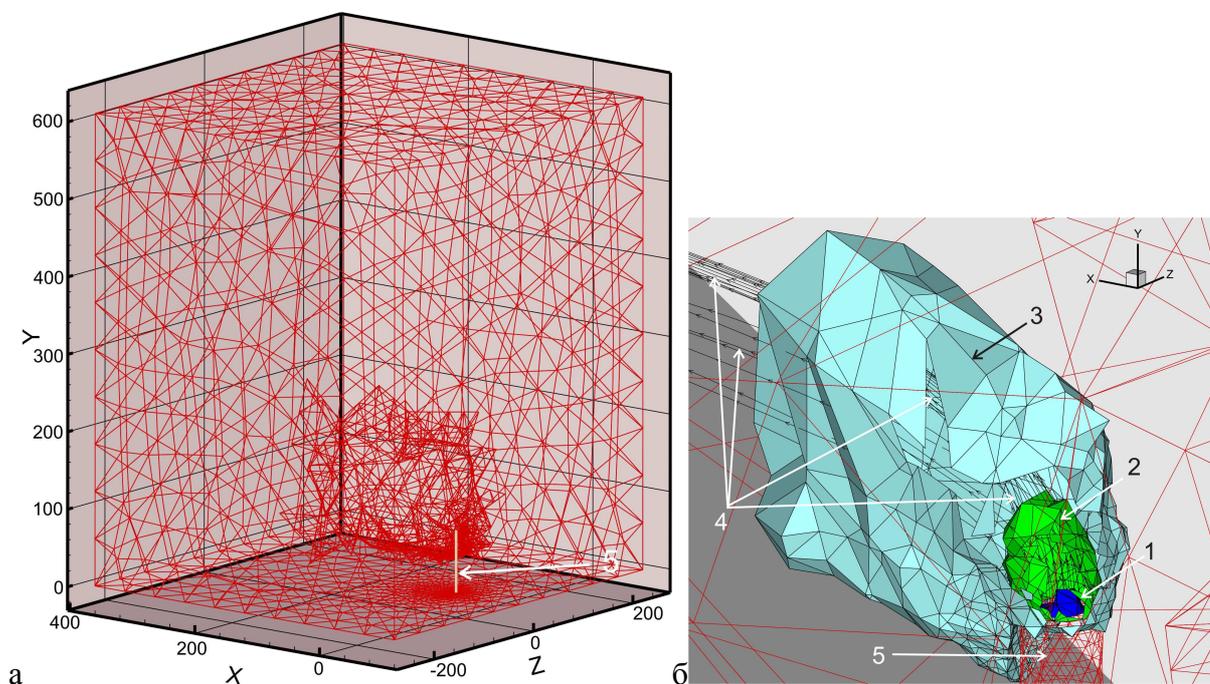


Рис. 3.32. Распространение выброса с начальной скоростью 10 м/с из круглой трубы: а – расчетная область, б – поверхности изотак. 1, 2, 3 – поверхности с $w_y=10$ м/с, 5 м/с, 1 м/с; 4 – контурные линии (линии тока) струи, 5 – труба

Так, например, вертикальная составляющая скорости, равная ее исходному значению $w_y = w_0 = 10$ м/с, сохраняется на расстоянии около $\frac{1}{3}$ диаметра устья трубы. На расстоянии до 1,5 диаметра величина вертикальной составляющей снижается вдвое. В приведенном случае после того, как она становится равной скорости обдувающего потока, в струе выброса начинает преобладать горизонтальная составляющая скорости. Наконец, на расстоянии далее 10 диаметров w_y становится менее 1 м/с, т.е. перестает оказывать существенное влияние на подъем потока выброса. Такие же соотношения характерны и для изменения температуры струи. Исходная температура сохраняется на расстоянии не более половины диаметра устья, и на расстоянии 1,5...2 диаметра струя охлаждается до 330К, т.е. подъемная сила снижается вдвое. При 6...7 калибрах (13,18м) она становится несущественной, т.к. температура струи уже не превышает 300К. На расстоянии далее 12 диаметров (23,72 м) температура потока сравнивается с окружающей температурой 293К.

Исходные концентрации компонентов выбросов также сохраняются только на выходе из устья трубы. На рис. 3.33а представлены изоконцентрационные поверхности диоксида углерода CO_2 , на рис. 3.33б – водяных паров H_2O . Концентрации CO_2 и H_2O на выходе из устья трубы составляют 0,12 и 0,08 массовых долей. На расстоянии 7-8 диаметров устья концентрации H_2O и CO_2 снижаются в 12,5-15 раз. При достижении поверхности факел из источника выброса высотой 80 м разбавляется приблизительно в 12000 раз.

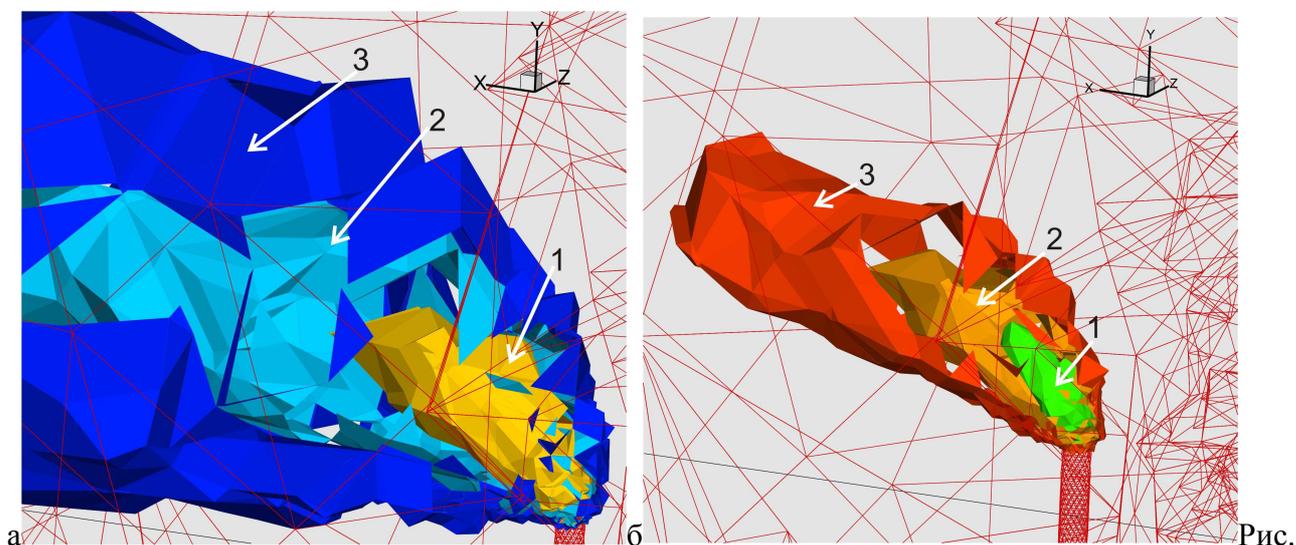


Рис. 3.33. Поверхности изоконцентраций: а – CO_2 , 1 – 0,8% мас., 2 – 0,2% мас., 3 – 0,03% мас.; б – H_2O , 1 – 1,8% мас., 2 – 0,64% мас., 3 – 0,24% мас.

Сравнение результатов расчета (рис. 3.34) показывает, что максимальные высоты подъема H по двумерной и трехмерной модели практически совпадают. Причина заключается в сильной зависимости H от исходных величин энергии и потенциала струи и их быстрой диссипации. Это позволяет использовать выражение (3.83) для определения высоты выброса в полученном ранее виде.

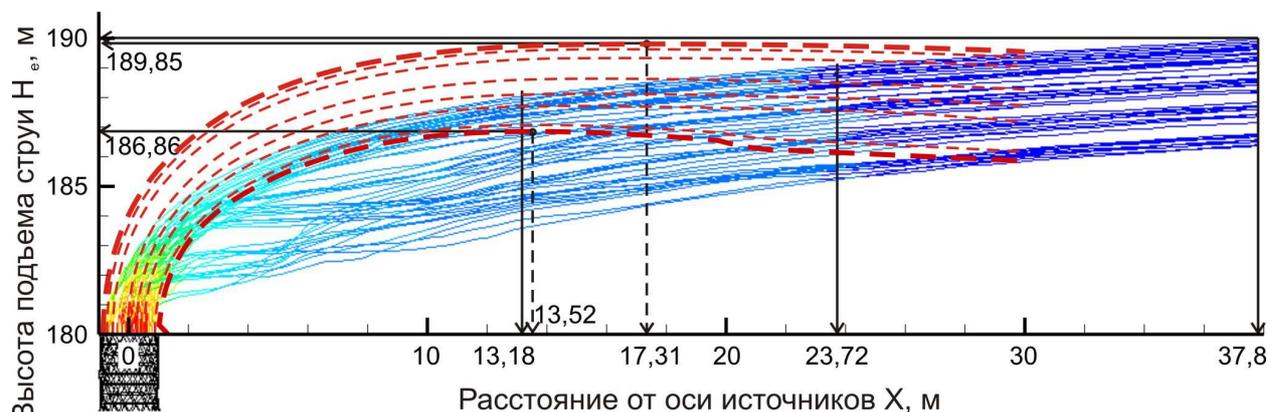


Рис. 3.34. Продольный профиль струи, распространяющейся из источника при $w_0=10$ м/с и $u_m=5$ м/с. Штриховыми показаны линии тока, полученные по 2d-модели, сплошными – по 3d-модели

Горизонтальные координаты максимальной точки подъема струи существенно различаются. Это объясняется влиянием на ее распространение зоны пониженного давления, образующейся в двумерной модели за длинномерным щелевым источником. Размеры аэродинамической тени за источниками компактной формы в трехмерной модели значительно меньше. Концентрационный факел выброса распространяется в виде конического образования с турбулентными волнами. Форма факела хорошо сохраняется, т.к. масштаб волн не превосходит $1/5$ ширины струи. Вместе с тем это вносит особенность в распределение концентраций компонентов выбросов на различных высотах над поверхностью. Так, при выбросе потока с исследованной интенсивностью на высоту до 20 м образуется по 3, а на высоту до 40 м – по 2 приблизительно равноценных пика концентраций вдоль оси факела. Влияние турбулентных волнообразований в факеле сглаживается только при высоте выброса более 50 м.

На рис. 3.35 приведено сравнение полученных результатов расчетов концентраций CO_2 вдоль оси факела выброса на различную высоту H над подстилающей поверхностью с расчетами, выполненными по ОНД-86. Для исследованных вариантов распространения потока рассчитывалась максимальная приземная концентрация легкого загрязнителя c_M , $\text{кг}/\text{м}^3$, опасной скорости ветра u_M для каждого источника. Затем она пересчитывалась на расчетную скорость ветра u , принятую в трехмерной модели. Для выбросов высотой 30...40 м расчетная и опасная скорости оказались приблизительно равными. В этой области наблюдается и совпадение результатов расчетов. В целом характер изменения зависимости концентрации от высоты выброса совпадает, однако для высоких труб зависимости, приведенные в ОНД, дают приблизительно в 1,5 раза большее разбавление, чем расчеты, проводимые непосредственно по уравнениям турбулентной диффузии. Полученные по результатам выполненных расчетов корректирующие зависимости представлены в поле рис. 3.35.

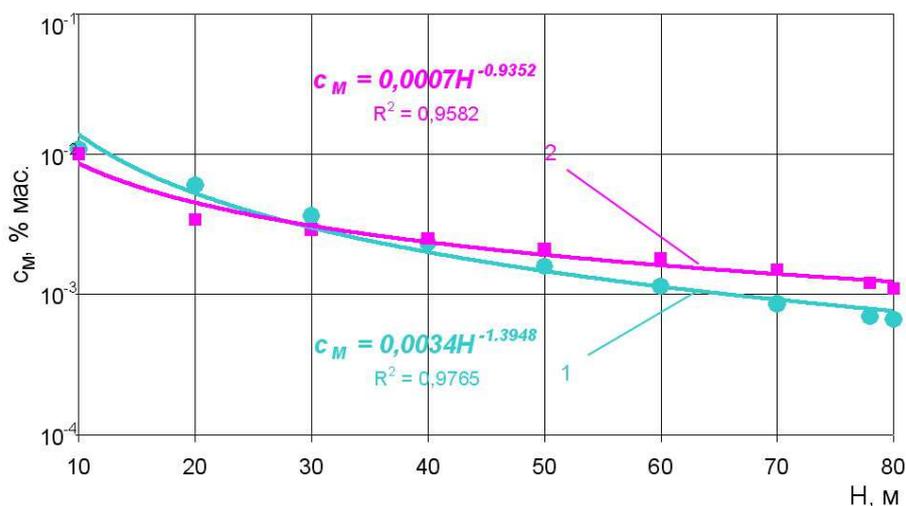


Рис. 3.35. Зависимость концентраций CO₂ вдоль оси факела выбросов от высоты выброса H : 1 – по ОНД-86, 2 – по результатам численных исследований

Таким образом, двух- и трехмерные численные исследования распространения неизоэтермического многокомпонентного выброса, проведенные методами вычислительной гидродинамики, позволили отработать схемы расчетов и диапазоны параметров, соответствующие стабильности и физической непротиворечивости получаемых результатов. Результаты численного моделирования атмосферной диффузии при опасной скорости ветра показали хорошее совпадение с данными расчетов по ОНД-86. По результатам расчетов получены корректирующие выражения для определения эффективной высоты выброса и максимальных приземных концентраций при заданной скорости ветра, которые могут использоваться в расчетах атмосферной диффузии выбросов из щелевых и круглых источников, а также при их конструировании.

Для определения скорости потока, его температуры и концентраций компонентов на выходе из трубы в реальных условиях составлена программа для ЭВМ «Критериальные оценки соответствия: расчеты теплового и аэродинамического режима дымовых труб ТЭС CATRC TRP». Тип ЭВМ для реализации программы: IBM PC; язык – VBA; ОС: Microsoft Windows 7 Professional with Service Pack 1 32/64-bit (Russian). Могут задаваться расход и состав топливного газа, коэффициент избытка воздуха, или непосредственно расход, температура и состав дымовых газов. Определяется распределение температуры по толщине стен трубы, в т.ч. на поверхностях всех слоев. Рассчитывается изменение температуры дымовых газов, теплофизических свойств, статического давления и скорости дымовых газов по высоте и на выходе трубы. Программа предназначена для проведения теплового и аэродинамического расчета дымовых труб ТЭС и других систем, использующих газообразное топливо. Расчеты выполняются для следующих конструкций дымовых труб: одно-, двух- и трехслойных, трех- и четырехслойных с воздушным зазором.

4 Опытные исследования адсорбционного и термического узлов системы комплексной обработки выбросов помещений КРУЭ с загрязнителями глобального действия – галогенсодержащими веществами

4.1 Опытное исследование режимов фонтанирования полидисперсного адсорбента в узле адсорбционной обработки выбросов

4.1.1 Сравнение с существующими исследованиями фонтанирования монодисперсных материалов

С целью экспериментального уточнения теоретических разработок, приведенных в разд. 2.5.3 по определению параметров фонтанирования полидисперсного материала, были проведены экспериментальные исследования на опытно – промышленной установке, предназначенной для системы обезвреживания выбросов ПО «Гасма», г. Казань.

Аппараты с фонтанирующим слоем в определенной степени могут рассматриваться как установки с псевдооживленным слоем, однако имеют ряд отличительных особенностей. Они могут работать в широком интервале диаметров частиц от 30 мкм до 30 мм, так как скорость потока по высоте слоя изменяется. Гораздо шире и область устойчивой работы таких аппаратов. Перепад давления фонтанирующего слоя всегда меньше, чем кипящего слоя в тех же условиях. При этом зависимость гидравлического сопротивления фонтанирующего слоя от скорости потока газа имеет характерную, присущую только этому классу аппаратов, форму. При небольшой скорости прохождения потока через слой он сохраняет свою первоначальную структуру. При этом его сопротивление идентично сопротивлению неподвижного слоя при фильтрации. При увеличении скорости потока возрастает порозность в центральной части слоя и начинается формирование центрального канала. Сопротивление слоя продолжает увеличиваться до определенного значения, называемого пиком давления, и затем резко падает. Пик давления соответствует такой структуре слоя, когда высота канала достигает приблизительно до половины высоты неподвижного слоя. Пик давления по своей величине может превышать статическое давление слоя материала в несколько раз. После образования достаточно высокого канала газ начинает прорываться через оставшийся слой в виде пузырей, следующих с определенной частотой. С последующим увеличением скорости потока частота образования пузырей растет, что приводит к дальнейшему снижению сопротивления слоя. Наконец, при определенном расходе пузыри сливаются и образуют канал, по которому проходит восходящий поток твердых частиц. Они поднимаются на определенную высоту, и затем вновь опускаются по периферии к входному отверстию. Высота подъема зависит от скорости подводимого газового потока, в то время как сопротивление фонтанирующего слоя практически остается постоянным. Так продолжается до тех пор, пока скорость потока не

превысит скорости витания частиц, что приводит к режиму пневмотранспорта и опорожнению аппарата. Поэтому весьма важным для работы аппаратов с псевдооживленным слоем являются исследования граничных режимов – перехода от фильтрации к фонтанированию и от фонтанирования к пневмотранспорту.

Устойчивость режима фонтанирования характеризуют тремя скоростями: критической скоростью w_{cr} , соответствующей пику давления, скоростью начала фонтанирования w_b и скоростью конца устойчивого фонтанирования w_e . Для определения режимных характеристик фонтанирования монодисперсных или близких к ним по гранулометрическому составу сыпучих материалов известен ряд проверенных многими исследователями и ставших классическими расчетных соотношений. Критическая скорость w_{cr} зависит от высоты слоя, физических характеристик твердой фазы, конструктивных параметров аппарата и множества других характеристик. Для определения w_{cr} и w_b при фонтанировании монодисперсных материалов в [177] была предложена получившая к настоящему времени распространение следующая эмпирическая зависимость:

$$\text{Re}_{cr(b)} = B \cdot \text{Re}_t \left(\frac{D}{d_0} - 1 \right)^{0,82} \left(\text{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{0,1} \quad (4.1)$$

где Re_{cr} – число Рейнольдса, подсчитываемое по скорости витания частиц w_t диаметром D_p ; B – эмпирический коэффициент, значение которого 0,364 для Re_{cr} и 0,706 для Re_b ; D , d_0 – диаметры верхнего основания слоя и нижнего основания конуса, м; θ – угол раскрытия конуса.

Приведенная эмпирическая зависимость физически корректно и однозначно, через скорость витания, связывает w_{cr} и w_b с размером частиц монодисперсного материала, т.е. с размером отдельной частицы. Однако характеристики засыпки как совокупности частиц (насыпная плотность, высота слоя, силы взаимодействия между частицами и др.) однозначно фиксируются в ней эмпирическими параметрами – B и показателями степеней. Если указанные физические характеристики отличаются от имевших место в работе [177], то применение выражения (4.1) может оказаться некорректным. При его использовании для сравнительной оценки параметров фонтанирования полидисперсной засыпки значения Re_t должны определяться по размеру частиц, лимитирующих потерю устойчивости слоя, а эмпирические параметры нуждаются в опытной проверке и корректировке.

Скорость начала фонтанирования w_b также зависит от характеристик частиц твердой фазы и определяется экспериментальным путем. К.Б. Мазуром ([179]) было предложено эмпирическое соотношение для скорости начала фонтанирования w_b , которое также относится к классическим зависимостям для фонтанирующего слоя:

$$w_b = \frac{D_p}{D} \left(\frac{d_0}{D} \right)^{0,33} \sqrt{2gH_0 \frac{\rho_p - \rho_G}{\rho_G}}, \quad (4.2)$$

где D_p, D – диаметр частиц и верхнего основания слоя, м; ρ_p, ρ_G – плотность частиц и газа, кг/м³; H_0 – высота слоя, м.

Формула по структуре соответствует теоретическому предположению о равенстве количества движения, приобретаемого частицами и теряемого газом. При этом выражение $\sqrt{2gH_0}$ должно представлять величину начальной скорости, которую имеет частица до преодоления высоты H_0 , равной высоте слоя. Однако в обычных конструкциях конических и цилиндроконических аппаратов скорости частиц у основания конуса равны нулю вследствие изменения направления движения частиц в этой области на противоположное. Вместе с тем М.И. Рабинович с авторами на основании сопоставления формул, предлагаемых различными авторами, с экспериментальными данными, отмечают, что выражение (4.2) дает достаточно близкие к эксперименту результаты.

Определение сопротивления развитого фонтанирующего слоя достаточно сложно. Аналитические зависимости выводятся исходя из баланса сил на периферии слоя, но получаемые формулы мало пригодны для практических расчетов. Большинство эмпирических зависимостей получено для монофракционных слоев с частицами геометрически правильной формы (в основном шарообразной). Имеются также зависимости, определенные на почти монофракционном материале одинаковой формы (семена зерновых культур), авторы которых рекомендуют их для случая полидисперсной засыпки. В то же время известен факт, что подача в фонтанирующий слой запыленного газа резко повышает его сопротивление. Поэтому рекомендации по применению эмпирических формул, полученных для монофракционной засыпки, к полидисперсному фонтанирующему слою, представляются недостаточно корректными. Величину сопротивления фонтанирующего слоя для практических расчетов М.И. Рабиновичем с авторами ([178]) предлагается принимать по соотношению:

$$\Delta P_f = C g \rho_a H_0, \quad (4.3)$$

где ρ_a – насыпная плотность частиц кг/м³, $C = (0,64-0,75)$ – коэффициент.

В (4.3) также очевидно присутствует начальная скорость $\left(\sqrt{2gH_0} \right)^2$. Поэтому модели, принятые в ([178, 179]) при составлении зависимостей (4.2, 4.3), могут использоваться для аппаратов с известной конструктивной особенностью на входе, обеспечивающей сглаживание пика давления перед потерей устойчивости слоя и соответствующую экономию энергоресурсов

на организацию процесса фонтанирования. Сопло, подводящее поток воздуха, должно выступать над уровнем основания конической части. Тогда на уровне среза сопла начальная скорость за счет инжектирующего эффекта не будет равна нулю. У таких аппаратов при расчетах соответствующих параметров по формулам (4.2, 4.3) высоту слоя неподвижной засыпки H_0 необходимо отсчитывать от уровня не основания, а среза сопла. Можно полагать, что эти зависимости применимы при нахождении характеристик фонтанирования полидисперсного слоя в подобных аппаратах, но нуждаются в эмпирических поправках. Так, в выражении (4.3) необходимо введение корректирующей поправки к численному параметру C . Он получен, по данным авторов работы ([178]), при испытаниях аппаратов с крупной засыпкой. Инжекция потоком крупных частиц, начиная с миллиметрового диапазона, могла бы заметно повлиять на результаты опытов при скорости потока на срезе сопла, сопоставимой со скоростью витания, т.е. выше 10-20 м/с. Поэтому инжектирующий эффект в параметре C выражения (4.3) не учтен.

На значение скорости потока конца устойчивого фонтанирования w_e влияют физические характеристики твердых частиц и газа, геометрия конической части аппарата, а также его высота и диаметр. Для определения w_e предлагаются эмпирические зависимости, которые не подходят для полидисперсного материала. Поэтому при необходимости максимальную скорость фонтанирования можно найти только экспериментальным путем.

Итак, классические зависимости (4.1, 4.2, 4.3) физически корректно описывают процесс фонтанирования монофракционного материала и могут служить основой расчетных соотношений для аналогичных параметров полидисперсной засыпки. Выражения (4.2, 4.3) учитывают и некоторые конструктивные особенности, обеспечивающие энергоэкономичность аппаратов с фонтанирующим материалом. Вместе с тем существующие рекомендации по непосредственному использованию отмеченных соотношений с подстановкой медианного диаметра полифракционной засыпки не представляются физически достаточно обоснованными. С целью нахождения корректирующих параметров и соотношений для расчетов параметров фонтанирования полифракционного слоя, составлен баланс действующих сил, включающий вандерваальсовы и капиллярные силы. На его основе составлен энергетический баланс, из условия нарушения которого получен безразмерный параметр потери устойчивости слоя LS . Он позволяет находить размер частиц фракции, лимитирующей начало фонтанирования, если соотношении размеров соседних фракций ϕ существенно отличается от 1. Для проверки положений, разработанных в теоретической части, выполнены соответствующие экспериментальные исследования, результаты которых представлены в следующем разделе.

4.1.2 Опытное определение характеристик фонтанирования полифракционного материала

Исследования ([263]) были выполнены с целью уточнения теоретических разработок, представленных в предыдущих разделах настоящего исследования, и определения аэродинамических характеристик работы в режиме фонтанирования аппарата с полифракционным адсорбентом для обработки ветвыбросов с галогенорганическими примесями и сушки диспергированного материала. В реальных условиях сыпучие материалы чаще всего полидисперсны, что заметно влияет на все аэродинамические характеристики режима фонтанирования и требует его детального изучения. Некоторые закономерности можно найти в работах, посвященных проблеме рассева по фракциям (классификации) сыпучих материалов. В работах [264, 265, 266] описано линейное приближение стохастической модели классификации. Указано слабое влияние вида спектра частиц внутри зоны разделения (фракции), на четкость классификации. Приводится метод расчета процесса классификации сыпучих материалов в виброоживленном слое (на виброгрохотах). Процесс блуждания частиц в слое считается квазидиффузионным, несимметричным. Считается, что кроме действия сил, стохастически (случайно) возникающих в слое, на вынужденный перенос частиц влияет также действие детерминированных гравитационных сил.

В работах [267, 268], посвященных математическому моделированию методом Монте-Карло и с использованием ЭВМ процессов разделения и вероятности сепарации частиц полидисперсного материала с определением времени пробега частиц из верхнего слоя к нижнему отмечено, что одним из наиболее влиятельных факторов является соотношение размеров частиц.

Эксперименты проводились с двумя типами засыпок: материала, близкого к монофракционному (узкая фракция порошка γ -оксида железа Fe_3O_4 с отношением размеров частиц соседних фракций менее 1,1), и полидисперсного (шамотная крошка размером от 63 до 710 мкм). Из последней создавались смеси различной дисперсности. Для этого материал рассеивался на 20 фракций в пределах указанных размеров. Затем из монофракций с размерами частиц, соответствующих размерам ячеек стандартных сит, составлялись смеси двух, четырех, восьми и двадцати фракций по принципам равномерного (РР) и логарифмически нормального (ЛНР) распределения фракций по массе. При этом принималось, что в пределах каждой фракции размеры частиц распределены по логарифмически нормальному закону, что соответствует составу большинства механически диспергированных материалов. В соответствии с литературными данными специальных исследований вопроса о закономерностях перемещения частиц в слое полидисперсного материала ([264, 265, 267, 268]), можно полагать,

что закономерность распределения материала в пределах фракций не влияет на закономерность его расположения в конусной засыпке, и, следовательно, на потерю устойчивости слоя засыпки в начале фонтанирования.

Схема и фотография установки приведены соответственно на рис.4.1 и в приложении П7. Отбросные газы подавались вентилятором 1 через сопло 2 в коническую часть контактного аппарата 3, где располагался слой сыпучего материала. Расход выбросов определялся при помощи диафрагмы 4 и микроманометра 5, а перепад давления фонтанирующего слоя – при помощи U-образного манометра 6. Через штуцер 7 по необходимости производилась добавка материала.

Несмотря на цилиндроконическую геометрию аппарата, он испытывался как конический. Цилиндрическая часть аппарата не заполнялась. В основном ее предназначение заключалось в обеспечении ряда технических условий, таких как увеличение времени контакта потока и частиц, уменьшение их уноса, возможность установки фильтра для мелких фракций. Одновременно обеспечивалось и свободное развитие фонтанирующего слоя. После контактного аппарата выбросы подавались на дальнейшую ступень обработки или удалялись.

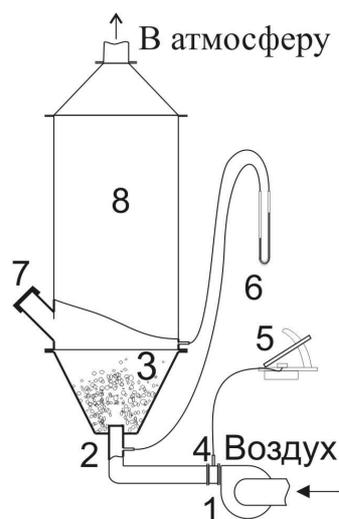


Рис.4.1. Схема контактного аппарата с фонтанирующим полидисперсным материалом: 1 – вентилятор, 2 – сопло ($d_0 = 25$ мм), 3 – коническая часть с фонтанирующим слоем, 4 – диафрагма, 5 – микроманометр, 6 – U-образный манометр, 7 – патрубок для подачи материала, 8 – цилиндрическая часть ($D = 200$ мм)

С целью энергосбережения при подаче газового потока входная часть аппарата была выполнена с двумя конструктивными отличиями от традиционных устройств. Для создания эффекта инжекции сопло, формирующее поток газа, установлено на 5 мм выше основания конуса. Входная часть отличается также тем, что поток подается под слой не по всему сечению нижнего основания диаметром $d_1 = 38$ мм, а через сопло диаметром $d_0 = 25$ мм. Поэтому

первичные процессы – фильтрация и увеличение порозности слоя, распространяются только на часть неподвижного слоя. В начале режима фонтанирования энергозатраты могут быть оценены по величине критической скорости w_{cr} , соответствующей пику давления, и скорости начала фонтанирования w_b . Они зависят от физических характеристик твердой фазы, конструктивных параметров аппарата (геометрии слоя) и др.

В представленном аппарате проведено исследование режимов фонтанирования двух типов засыпок – с монофракционным и полидисперсным материалами. Испытания монофракционного материала – порошка γ -оксида железа Fe_3O_4 , состоящего из игольчатых частиц средним размером 0,1 мм, проводились как тестовые с целью эмпирического учета особенностей исследуемого аппарата и слоя, отличающих их от условий классических испытаний. Результаты испытаний приведены на рис. 4.2 (кривая *a*).

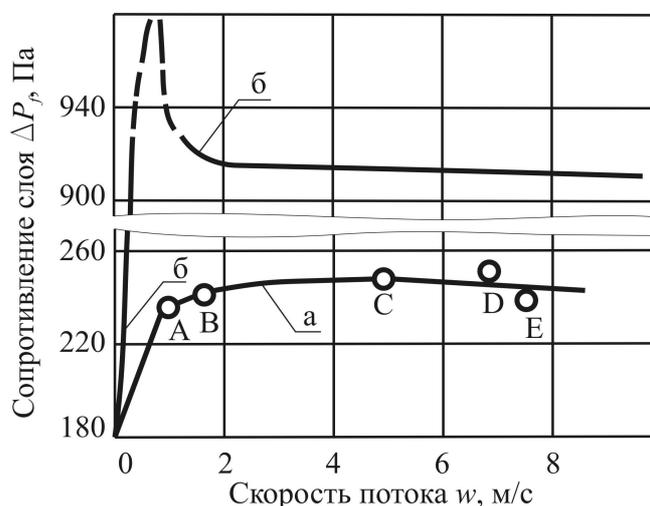


Рис. 4.2 Параметры режима фонтанирования монодисперсного материала – порошка γ -оксида железа Fe_3O_4 : *a* – экспериментальные, *б* – рассчитанные по формуле 4.3.

Началу фонтанирования соответствует точка *A* при скорости потока $w_b = 0,7$ м/с и сопротивлении слоя 235 Па. При этом пика давления не обнаружено. Увеличение скорости газа до 1,2 м/с привело к росту давления до 243 Па (точка *B*). При дальнейшем увеличении скорости газа сопротивление фонтанирующего слоя оставалось практически постоянным (точки *C*, *D*, *E*). Точки на экспериментальной кривой: *A* – начало фонтанирования при скорости потока $w_b=0,7$ м/с и сопротивлении слоя $\Delta P_f=235$ Па; *B*, *C*, *D*, *E* – промежуточные контрольные точки в режиме устойчивого фонтанирования с параметрами (1,2 м/с, 243 Па; 4,9 м/с, 247 Па; 6,8 м/с, 250 Па; 7,5 м/с, 238 Па), показывающие незначительное изменение сопротивления слоя

Качественные и количественные отличия опытного графика сопротивления фонтанирующего слоя (кривая *a*) от описанных в литературе (кривая *б*) вызвано отмеченными выше конструктивными особенностями контактного аппарата. Сопло, формирующее поток

газа, было установлено на 5 мм выше основания конуса. Это обеспечило инжектирующий эффект в области, где скорость частиц должна быть равной нулю. В результате частицы на начальном участке уже имели возможность приобрести определенную кинетическую энергию. Это позволяет при полидисперсной засыпке перестроить структуру слоя плавно и с меньшими затратами энергии. Вероятность того, что приобретенной энергии будет достаточно для нарушения устойчивости, у полидисперсного слоя намного выше. Таким образом, конструкция контактного аппарата достаточно близка к модели, принятой М.И. Рабиновичем и авторами [178] при составлении выражений (4.2, 4.3). Поэтому указанные соотношения вполне могут использоваться с численными поправками на полидисперсность.

Сравним результаты экспериментов с расчетными данными по соотношениям (4.2, 4.3), включающим в себя величину начальной скорости частицы в виде $\sqrt{2gH_0}$. В соответствии с соотношением (4.3) при насыпной плотности частиц $\rho_a = 2810 \text{ кг/м}^3$ и $H_0 = 0,05 \text{ м}$ получим: $\Delta P_f = (882 \dots 1033) \text{ Па}$. По данным наших экспериментальных исследований максимальная величина давления в режиме развитого фонтанирования $\Delta P_f \sim 250 \text{ Па}$ (точки С и D), т.е. расчетная величина давления оказывается в 3,5...4 раза выше экспериментальных данных.

Скорость начала фонтанирования по формуле (4.2) при медианном диаметре частиц $D_m = 0,1 \text{ мм}$, $D = 70 \text{ мм}$, $d_0 = 25 \text{ мм}$, плотности материала частиц $\rho_p = 7301,2 \text{ кг/м}^3$ составляет $w_b = 0,078 \text{ м/с}$, что на порядок ниже экспериментальных данных.

Коэффициенты рекомендуемых для расчетов выражений (4.1, 4.2, 4.3) устанавливались по результатам испытаний аппаратов традиционных конструкций. Поэтому для рассматриваемой конструкции необходима опытная корректировка коэффициентов.

Недостаточно близкие результаты могут быть объяснены также тем, что в (4.1, 4.2, 4.3) используются данные экспериментов с монофракциями частиц компактной формы (зерна или семена растительных культур). При этом размер частиц самой мелкой из испытанных фракций составлял 0,6 мм. В наших исследованиях использовались или полифракционная засыпка шамотной крошки с частицами размером от 0,063 до 0,6 мм или близкий к монофракции порошкообразный оксид железа со средним размером частиц 0,1 мм ([269]). Как следует из приведенных данных, диапазон испытанных нами частиц значительно меньше, а частицы оксида железа имеют весьма некомпактную – игольчатую форму.

Результаты выполненных экспериментальных и теоретических исследований по фонтанированию полифракционного слоя могут корректно сопоставляться с исследованиями по фонтанированию монофракционной засыпки [177] вследствие того, что обобщения исследований указанных авторов выполнены на основе общего для любых частиц закона движения в восходящем потоке выбросов. В формуле Романкова и Рашковской (4.1) за основу

принято фундаментальное для процесса фонтанирования (как моно- так и полифракционного слоя) действие по отрыву от слоя и подъему одиночной частицы определенного размера потоком обтекающего выбросов. Это действие выражается через число Рейнольдса, определяемое по скорости витания, через которую он оказывается непосредственно связанным со всеми параметрами, регулирующими подъем этой частицы. При этом вклад энергетики процесса отрыва частицы от слоя фиксируется эмпирическими коэффициентами и показателями выражения (4.1).

Следовательно, оно будет давать правильные результаты, если в нем будут использованы соответствующие реальному процессу и условиям эксперимента параметры частиц, воздушной среды и аппарата. Однако это соотношение индифферентно по определению размера частиц. В монофракционной засыпке принимается, что все частицы имеют одинаковый размер, и необходимости в определении размера частиц, при сдвиге которых теряется устойчивость слоя, нет. Вследствие этого в случае фонтанирующего монофракционного слоя все необходимые параметры для расчета определяются однозначно, и формула дает верные значения критической скорости. В тоже время для полифракционной засыпки размер частиц, который соответствует реальному процессу потери устойчивости слоя и должен быть использован в формуле (4.1), неизвестен. При использовании медианного диаметра частиц полифракционного слоя значение критической скорости, найденное по (4.1), оказывается заметно выше экспериментального (таблица 4.1).

Выполним проверку сходимости теоретических соотношений по потере устойчивости слоя засыпки при фонтанировании, полученных на основе уточнения решения задачи о нулевых колебаниях, с результатами экспериментов, представленных в данном разделе, и классических, приведенных в [177]. Определим также скорости критическую и начала фонтанирования по обобщенной на основе закономерности движения частиц в восходящем потоке воздуха эмпирической зависимости (4.1), представив ее в виде:

$$w_{cr} = 0,364w_t \left(\frac{D}{d_0} - 1 \right)^{0,82} \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{0,1}; w_b = 0,706w_t \left(\frac{D}{d_0} - 1 \right)^{0,82} \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{0,1} \quad (4.4)$$

где w_t – скорость витания частиц, м/с; $\theta = 30^\circ$ – угол раскрытия конуса испытанного контактного аппарата.

В воздухе при нормальных условиях скорость витания w_t частиц с размером 0,1 мм и плотностью $\rho_p = 7300 \text{ кг/м}^3$ равна 2,1 м/с. Тогда, в соответствии с (4.4), $w_{cr} = 1,09 \text{ м/с}$, и $w_b = 2,1$

м/с. Следовательно, по соотношениям (4.1), в которых отсутствует учет инжекции частиц потоком, скорости завышены по сравнению с экспериментом более чем на 250%.

По сравнению с экспериментальными данными результаты расчета w_b для слоя порошка оксида железа по выражению (4.2) занижены на порядок. Это объясняется тем, что оно основано на данных экспериментов с монофракциями крупных частиц сферической формы. Для вычисления по (4.2) параметров фонтанирования фракций частиц меньшего размера необходима поправка на размер $\Delta = [(\delta - D_p) / (D_p)]^2$, а частиц некомпактной формы – также на форму Φ . Для частиц, форма которых сильно отличается от компактной, потребуется эмпирический подбор поправки Φ . При этом целесообразно принять ее в виде обычно используемого в таких случаях коэффициента формы, определенного, например, в [270] как «площадь поверхности сферы, объем которой равен объему частицы, отнесенная к площади поверхности частицы», с эмпирическим корректирующим коэффициентом k .

Необходимо также учесть еще одну отмеченную выше конструктивную особенность исследуемого аппарата. Выражение (4.2) составлено для устройств, в которых поток подается через все нижнее основание конуса. Если в нем установлено приподнятое сопло равного диаметра, то за счет инжекции будут приобретать начальную скорость $w_0 = \sqrt{2gH_0}$ и приходить в движение все частицы неподвижного слоя по периметру сопла. Диаметр сопла d_0 в исследованном аппарате меньше диаметра нижнего основания конуса $d_1 = 38$ мм. Поэтому на частицы, расположенные в кольце площадью $Q = 0,785(d_1^2 - d_0^2)$ на уровне сопла и выше у конусных стенок, инжектирующий эффект в начальный момент не распространится, что может послужить причиной возрастания значения начальной скорости. Для учета этой особенности в величину $\sqrt{2gH_0}$ необходимо внести поправку в виде безразмерного конструктивного симплекса $\Xi = (1 - Q_r)$, в котором $Q_r = (d_1^2 - d_0^2) / d_0^2$ – относительная площадь. При подаче потока через всю площадь нижнего основания конуса $\Xi = 1$. Преобразуем (4.2) с учетом вышесказанного:

$$w_b = \Delta \cdot k \Phi \frac{D_p}{D} \left(\frac{d_0}{D} \right)^{0,33} \sqrt{2gH_0 \Xi \frac{\rho_p - \rho_G}{\rho_G}} = \frac{\Delta \cdot k \Phi D_p d_1}{D^{1,33} d_0^{0,67}} \sqrt{2gH_0 \frac{\rho_p - \rho_G}{\rho_G}} \quad (4.5)$$

Для исследованного случая $\Phi \approx 0,5$, а $\Delta \cdot k$ изменяется в пределах от 12 до 20; здесь средние размеры частиц по литературным данным $\delta \approx 2,1$ мм, по опытным данным $D_p = 0,1$ мм, опытное значение $k = (0,03 \dots 0,05)$. В соответствии с (4.5), при опытных значениях $D = 70$

мм, $H_0 = 55$ мм значение $w_b = (0,72 \dots 1,2)$ м/с. Таким образом, на основании тестовых испытаний с монофракционным материалом найдены эмпирические соотношения параметров, учитывающих отличия проводимого эксперимента от классического.

Для экспериментального исследования параметров фонтанирования полидисперсного материала была использована шамотная крошка. Измельченный шамот классифицировали на ситах по размерам фракций от 0,063 до 0,71 мм, из сочетаний которых составляли различные варианты засыпок. Насыпная плотность слоя $\rho_a \approx 1500$ кг/м³, плотность шамота $\rho_p = 2800$ кг/м³. На рис. 4.3 приведены результаты испытаний режимов фонтанирования композиции из равных массовых долей фракций с размерами частиц 0,4-0,5, 0,5-0,63 и 0,63-0,71 мм (медианный диаметр $D_m = 0,55$ мм, среднее значение $\phi = 1,22$).

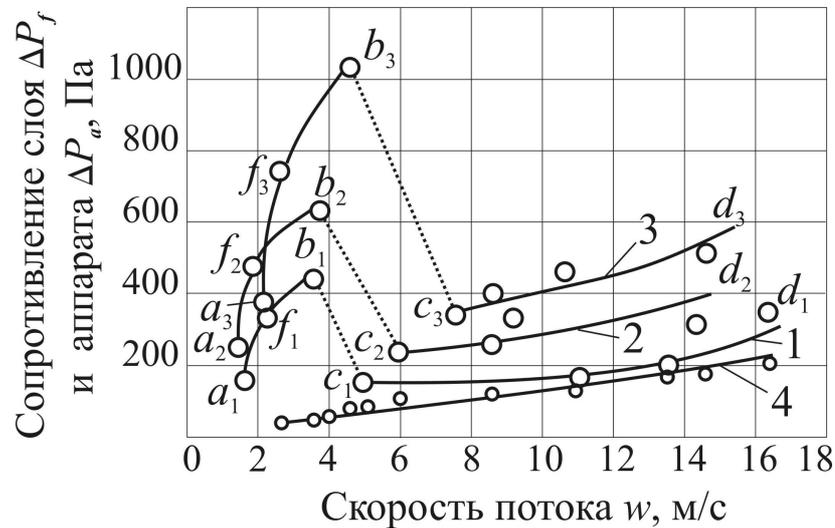


Рис. 4.3. Зависимость аэродинамического сопротивления слоя частиц ΔP_f и корпуса аппарата ΔP_a от скорости потока

На рис. 4.3 представлена зависимость сопротивления адсорбента ΔP_f от скорости газового потока w . Параметры режима фильтрации газа через слой адсорбента отображены на графиках кривыми ab , а параметры фонтанирующей системы - кривыми cd . Точки b соответствуют максимальному сопротивлению слоя адсорбента, точки d - скорости начала пневмотранспорта частиц из слоя.

В исследованных режимах (на рис. 4.3 им соответствуют линии и индексы 1, 2, 3) количество материала в засыпках соотносилось как 1:2:4. При этом конусная часть аппарата заполнялась на высоту 40, 60 и 80 мм, (линии 1, 2 и 3 на рис. 4.3). Параметры точек a_i , b_i соответствуют началу фильтрации и максимальному сопротивлению слоя, c_i , d_i - началу и концу устойчивого фонтанирования. Кривые $a f_i$, $f_i b_i$ соответствуют фильтрации через неподвижный слой с начальной структурой и возросшей порозностью, кривая 4 -

сопротивлению ΔP_a конусной части пустого аппарата. Испытания проводились по методике, представленной в ([271]).

Параметры фонтанирующего слоя будем находить по размеру частиц, лимитирующих потерю устойчивости слоя. Определим этот размер по полученной в разд. 2.5.3 теоретической формуле 2.170 для осушенного воздуха, считая существенным только вандерваальсово взаимодействие. Зависимость постоянной Липшица – Ван дер Ваальса от лимитирующего радиуса частиц $\hbar\omega_R = f(R_{\text{lim}})$ в интервале размеров полидисперсной смеси испытанного состава $2R_{\text{lim}}=710\cdot 10^{-6}-400\cdot 10^{-6}$ м получим, используя найденные в разд. 2.5.3 значения $\hbar\omega = 3,36\cdot 10^{-2}-24$ Дж/кмоль для интервала размеров $2R_{\text{lim}}=710\cdot 10^{-6}-60\cdot 10^{-6}$ м. Интерполированием в указанных пределах получим: $\hbar\omega_R = 26,179 - 36407,285 \cdot 2R_{\text{lim}}$ Дж/кмоль. Значение постоянной $\hbar\omega_p$ для количества вещества M_p , кмоль, в частице искомого размера R_{lim} :

$$\hbar\omega_p = \hbar\omega_R M_p = 4\pi\hbar\omega_R R_{\text{lim}}^3 \rho_p / 3M = (109,65 - 152490,85 \cdot 2R_{\text{lim}}) R_{\text{lim}}^3 \rho_p / M, \quad (4.6)$$

где $M = 102$ кг/кмоль – молекулярная масса вещества частицы, принятая по шамоту (Al_2O_3).

Подставим (4.6) в (2.170):

$$R_{\text{lim}} = 0,145 \sqrt[4]{\frac{\hbar\omega_p}{\rho_p (\varphi^3 - 1)}} = 0,145 \sqrt[4]{\frac{(109,65 - 152490,85 \cdot 2R_{\text{lim}}) R_{\text{lim}}^3}{M (\varphi^3 - 1)}} \quad (4.7)$$

Отсюда $R_{\text{lim}}=220\cdot 10^{-6}$ м и $D_{\text{lim}}=440\cdot 10^{-6}$ м. Сопоставим результаты экспериментов и расчета по соотношениям (4.1, 4.2, 4.3), используя значения медианного и лимитирующего диаметров.

Расчет по (4.3) на основе D_{lim} для 1, 2 и 3 слоев (рис. 4.3) дает значения ΔP_f в пределах (375-440) Па, (560-660) Па и (750-880) Па соответственно. Это в 1,5-2 раза превышает экспериментальные данные (рис. 4.3), что объясняется наличием инъекции частиц потоком у среза сопла. Вместе с тем влияние этого эффекта зависит от размера частиц. Поэтому в расчетах ΔP_f полидисперсного материала выражение (4.3) может использоваться при условии корректировки опытной зависимостью, учитывающей дисперсность. Ранее было показано, что при использовании в (4.3) медианного диаметра засыпки расхождение с опытом может превзойти 350%. Более характерным показателем полидисперсности слоя в рассматриваемом случае (при поиске параметра, связанного с началом фонтанирования) может служить лимитирующий размер частиц. Приведенные экспериментальные данные позволяют составить на его основе необходимую поправочную зависимость. Для аппаратов рассматриваемого типа она аппроксимируется с достоверностью 94,5% в виде $f(D_{\text{lim}}) = 0,25 \ln(D_{\text{lim}}) + 0,895$. Используя

ее, можно представить соотношение (4.3) для расчета максимального давления полидисперсного слоя как

$$\Delta P_f = (0,64 \dots 0,75)(0,25 \ln D_{\text{lim}} + 0,895) g \rho_a H_0. \quad (4.8)$$

Расчеты с D_{lim} позволяют сократить ошибку в 1,5 раза. Это показывает, что характерным параметром на стадии фонтанирования частиц полидисперсного слоя может служить лимитирующий, а не медианный диаметр. Вместе с тем и при использовании D_{lim} расчетные результаты еще значительно выше опытных. Конструкция ввода потока в исследуемом аппарате обеспечивает меньшие энергозатраты на начальный сдвиг неподвижного конического слоя за счет инъекции потоком частиц, расположенных в его основании. Поэтому соотношения (4.1 и 4.4) непосредственно в представленном виде неприменимы для расчетов параметров фонтанирования полидисперсной засыпки в аппарате с отмеченной конструктивной особенностью.

Для рассмотренного сочетания конструктивных особенностей исследованного аппарата и полидисперсного материала принципы составления соотношений (4.1, 4.2) являются взаимодополняющими, а каждый в отдельности недостаточен. В соотношении (4.1), корректно описывающем параметры фонтанирования отдельных зерен засыпки через скорости витания, отсутствуют параметры, характеризующие инъекционное воздействие потока на зерна в слое.

Таблица 4.1. Рассчитанные по формулам (4.1, 4.4) и экспериментальные значения критической и начальной скорости фонтанирования

Используемый в расчетах диаметр частиц	Диаметр, м	Скорость витания частиц w_{ts} , м/с	Критическая w_{cr} /начальная w_b скорость, м/с, при диаметре верхнего основания слоя D , м		
			0,059	0,07	0,08
медианный D_m	$0,55 \cdot 10^{-3}$	26,1	10,7/20,8	13,5/26,2	15,9/30,8
лимитирующий D_{lim}	$0,441 \cdot 10^{-3}$	16,8	7,0/13,6	8,8/17,1	10,4/20,2
По опытным данным (рис. 4.3)			3,7/4,9	3,8/6,0	4,8/7,6

Выражение (4.2), учитывающее инъекционный эффект, дает адекватный результат только в диапазоне частиц выше миллиметрового, т.е. для условий, в которых были получены эти выражения. При составлении корректного расчетного соотношения для определения w_b необходимо основываться на обоих принципах. Введем в (4.5) согласно с формулой (4.2)

соотношение $(D/d_0-1)^m$ и изменим показатели степени в выражении $(D^n d_0^l)$. Константы m, n, l скорректированы по опытным данным с учетом соблюдения условия $\partial w_b/\partial H_0 = 0$; $\partial w_b/\partial D = 0$: $m=1,1$; $n=1,63$; $l=0,37$. При этом среднеквадратичное отклонение от опытных данных находится в пределах 20%. С учетом стохастического характера процесса можно считать эту сходимость удовлетворительной. Представим расчетное выражение для w_b в окончательном виде:

$$w_b = \Phi k \Delta \cdot D_p d_1 (D/d_0 - 1)^{1,1} \sqrt{2gH_0(\rho_p - \rho_G)/\rho_G} / (D^{1,63} d_0^{0,37}) \quad (4.9)$$

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы. Классические соотношения (4.1, 4.2, 4.3), составленные по данным опытных исследований фонтанирования монофракционной засыпки, могут быть использованы в качестве основы расчетных соотношений для полидисперсного материала. При этом расчеты должны проводиться по лимитирующему, а не по медианному размеру частиц размер частиц. Лимитирующий размер является характерным параметром процесса фонтанирования полидисперсной засыпки. Он соответствует диаметру частиц, с которых начинается нарушение ее устойчивости, и может быть определен из баланса сил, возникающих между соприкасающимися частицами в слое, включая силы поверхностного межмолекулярного взаимодействия. Выполнены также расчеты лимитирующего диаметра в случае паритетного общего действия массовых, межмолекулярных и капиллярных сил, которое описывается балансовыми уравнениями (2.164, 2.165, 2.166). С использованием в них найденного выше интерполированием значения для $\hbar\omega_p$,

$$R_l = \sqrt{\frac{8\sigma l + \sqrt{(8\sigma l)^2 + [16\pi\rho_p g(\varphi^3 - 1)/3]}(26,18 - 72815R_l)0,0244\pi R_l^3 \rho_p / M}{8\pi\rho_p g(\varphi^3 - 1)/3}},$$

получим: $R_{lim} = 464 \cdot 10^{-6}$ м и $D_{lim} = 928 \cdot 10^{-6}$ м.

Выполнен также расчет R_{lim} по выражению (2.168) без учета коэффициента ослабления капиллярных сил, что может соответствовать предварительной обработке топлива в различных условиях, характеризующихся повышенной влажностью, например, в начальной стадии продувки слоя сырого угля с температурой ниже точки росы:

$$R_{\text{lim}} = 0,441 \sqrt{\sigma / [\rho_p (\varphi^3 - 1)]} = 0,00249 \text{ м.}$$

В соответствии с расчетами, размер частиц с наиболее слабой связью в полидисперсном слое при действии капиллярных сил примерно на порядок превышает аналогичный размер при действии только межмолекулярных сил.

Для аппаратов, конструктивно отличающихся от традиционных, формулы (4.1, 4.2, 4.3) необходимо дополнить корректирующими коэффициентами и соотношениями. В данной работе такие зависимости получены для аппаратов с исследованными конструктивными особенностями и полидисперсной засыпкой (формулы 4.8, 4.9). Сравнение результатов экспериментальных исследований с величинами, рассчитанными по соотношениям для монофракционных систем, показывает также, что переход полидисперсных систем в фонтанирующий режим происходит при меньших затратах энергии газового потока. Использование этого свойства имеет очевидное прикладное значение в смысле снижения энергозатрат при работе технологических и очистных устройств с фонтанирующим адсорбентом.

В целом диапазоны скоростей потоков, соответствующие различным режимам работы установки, определены для 19 композиций с РР и ЛНР монофракций. Графики показывают, что значения максимальных сопротивлений слоя и скоростей начала фонтанирования растут с увеличением исходной высоты слоя, а скорости начала пневмотранспорта при одном и том же соотношении размеров частиц в смеси незначительно зависят от этого параметра.

Исследования также показали, что зависимость сопротивления фонтанирующего адсорбента от скорости газового потока имеет сложный характер. Так, если кривая $c_1 d_1$ для слоя с начальной высотой засыпки 40 мм удовлетворительно аппроксимируется в диапазоне скоростей 5..18 м/с степенной зависимостью с порядком более двух –

$$\Delta P = 44[(0,2w - 1)^{2,35} + 5] \text{ Па,} \quad (4.10)$$

то аналогичные зависимости для более массивных слоев (кривые $c_2 d_2$ и $c_3 d_3$) имеют порядок меньше единицы. Представляют также интерес опытные данные в интервале скоростей, соответствующих режиму фильтрации. При невысоких скоростях потока (1,5...3 м/с) зависимость $\Delta P = f(w)$ близка к квадратичной (кривые af), что указывает на отсутствие каких-либо перемещений в слое и позволяет рассматривать его как сопротивление недиспергированного пористого тела (или как местное сопротивление объекта сложной

конфигурации). С увеличением энергии газового потока положение частиц в слое относительно друг друга начинает изменяться. В этом режиме вплоть до начала фонтанирования слой представляет собой систему хаотично перемещающихся частиц, усредненные параметры движения которых существенно зависят от соотношения их размеров и плотности упаковки, т.е. от дисперсного состава и порозности системы. Результаты экспериментов показывают, что зависимость сопротивления такого слоя от скорости потока отличается от квадратичной, что особенно заметно для массивных слоев (кривые f_2b_2, f_3b_3). Известно, что характер зависимости аэродинамического сопротивления одиночного (недиспергированного) объекта от скорости потока в автомодельной области обтекания является постоянным. Это позволяет находить критические параметры режима фильтрации посредством сравнения аэродинамических характеристик слоя дисперсного материала с характеристиками какой-либо пористой недиспергированной системы. На рис. 4.3 приведено сравнение аэродинамического сопротивления корпуса аппарата ΔP_a и слоя частиц ΔP_f при одинаковых скоростях газового потока. Изломы на графиках в точках f позволяют найти параметры перехода полидисперсной системы из неподвижного состояния в подвижное и установить границы различных режимов фильтрации. Результаты проведенных исследований выявили также существенные различия между основными характеристиками фонтанирования моно- и полидисперсного материала. Сравнение результатов экспериментальных исследований с величинами, рассчитанными по эмпирическим зависимостям для частиц одинакового размера, показало, что расчетные значения максимального сопротивления слоя заметно выше наблюдаемых в эксперименте. Следовательно, переход полидисперсных систем в фонтанирующий режим происходит при меньших затратах энергии газового потока. Использование этого свойства имеет очевидное прикладное значение: существенное снижение энергозатрат на очистку газовых выбросов в аппаратах с фонтанирующим адсорбентом.

Итоги данного раздела также служат подтверждением соответствия практическим данным теоретических результатов по потере устойчивости слоя полифракционной засыпки при фонтанировании, полученных на основании уточнения решения задачи о дисперсионных взаимодействиях. Полученные результаты показывают соответствие наших теоретических и экспериментальных исследований с классическими исследованиями по фонтанированию сыпучих материалов, представленными в работах (177, 178, 179, 270).

Результаты определения лимитирующих диаметров в целом показывают, что предложенная методика обеспечивает получение реальных параметров процессов обработки измельченного твердого топлива и могут быть внедрены в практику проектирования агрегатов с фонтанирующим режимом. Это позволило бы упростить эксплуатацию и повысить надежность

генераторов по сравнению с ЦКС. Пока же из-за отсутствия официальных проектных методик и опыта эксплуатации распространение фонтанирующего режима на процессы сжигания и газификации забалластированных твердых топлив непосредственно в топках парогенераторов ТЭС становится задачей ближайшей перспективы. Вместе с тем результаты исследований позволили разработать и запроектировать системы обработки полидисперсного материала в фонтанирующем слое (приложение Пб).

4.2 Результаты опытных исследований горелочных устройств узла термической обработки выбросов помещений КРУЭ и методика расчета систем термообработки

Фронт пламени может распространяться самопроизвольно только в определенных концентрационных пределах газового топлива и окислителя, численные значения которых зависят от их вида. Для смесей природных газов с воздухом максимальный коэффициент избытка воздуха α , соответствующий нижнему пределу распространения пламени, приблизительно равен двум. В некоторых случаях необходима работа горелочных устройств с коэффициентами избытка воздуха более 2. Горелки, работающие с повышенными избытками воздуха, используются для создания необходимых температурных режимов в различных типах технологических печей; причем величиной α можно регулировать температурный уровень в определенной зоне печи. Горелки, работающие с высокими избытками воздуха, целесообразны для установок термической обработки вентиляционных выбросов, так как при соответствующих значениях α они обеспечивают полное обезвреживание токсичных соединений и экономичность расхода топлива ([67, 190, 192, 194]). Однако сжигание газоздушных смесей с $\alpha > 2$ требует искусственной стабилизации фронта горения. Были проведены исследования работы горелок с двумя принципами стабилизации: пилотным пламенем и с созданием зон рециркуляции продуктов сгорания к корню факела за счет закрутки газоздушной смеси. Исследования проводились на стендовых установках института Ленгипроинжпроект, г. Ленинград – Санкт-Петербург ([272]) и филиала Казахского политехнического института в г. Каратау (Респ. Казахстан) ([273]). Определялись концентрации оксида и диоксида углерода, оксидов азота.

Анализ проблемы (разд. 2.5.5) показал, что для систем термообезвреживания отбросных газов требуются конструкции, сочетающие преимущества принципов сжигания газообразного топлива с отдельной подачей и с предварительно подкотовленной смесью с воздухом. Простое совмещение в одной горелке конструкций реализующих эти принципы дутьевых и инжекционных горелок, как это предусматривается в горелках для паяльных и стеклодувных работ ([199]), также не удовлетворяет поставленным целям. При работе инжектора для создания гомогенной смеси используется воздух окружающей среды. При обработке вентиляционных

выбросов их количество исчисляется сотнями тысяч кубометров. Поэтому необходимо использовать отбросные газы в качестве воздуха для горения. Добавление к ним чистого атмосферного воздуха приводит к значительному перерасходу топлива.

В качестве примера дутьевых газовых горелок с близкими к поставленным требованиям качествами можно привести конструкции по [274, 275]. Горелка по [274] имеет завихрители в воздушном тракте и цилиндрический наконечник в форме стакана с рассекателями по газовому тракту. Однако такая конструкция не позволяет регулировать в широких пределах коэффициент избытка выбросов и тепловую мощность из-за возможности отрыва. Горелка по [275] содержит установленную по оси корпуса и заглушенную с выходного торца газовую трубу с отверстиями, и соосно размещенный вокруг газовой трубы насадок, в полости которого выполнена камера предварительного смешения, образованная сопряженными коническим и цилиндрическим участками. Насадок на входе снабжен конической обечайкой, сопряженной большим внутренним диаметром с большим диаметром конического участка камеры. Между корпусом и насадком имеется кольцевой зазор, наличие которого ухудшает качество сжигания газа. При колебаниях давлений газа и выбросов соотношение количеств количества первичного воздуха, проходящего в отверстия камеры смешения, и вторичного, проходящего через кольцевой зазор, ввиду небольшого гидравлического сопротивления последнего, будет нарушаться, что ухудшит нормальные режимы горения и стабилизации. Увеличение подачи вторичного воздуха с выбросами ведет к охлаждению зоны горения и ухудшению стабилизационных характеристик, и кроме того, к химическому недожогу, что недопустимо для горелочных устройств установок термообработки. Это приводит к ограничению диапазона регулирования, снижению экономичности и эксплуатационной надежности горелочного устройства. Исходя из этого, разработаны и испытаны конструкции горелки, при конструировании которых были учтены недостатки аналогов ([205, 206, 207]). В горелке с пилотным стабилизатором, представленной на рис. 4.4а, внешний больший диаметр насадка, образованный обечайкой и коническим участком насадка, выполнен равным внутреннему диаметру воздухоподающего корпуса. Между цилиндрическим участком камеры смешения и торцевой частью воздухоподающего корпуса выполнен кольцевой зазор. В стенах конической обечайки выполнены отверстия, наклоненные относительно оси корпуса. Воздух с давлением до 3 кПа подается по трубопроводу 1. Подача газа осуществляется по трубопроводу 2, проходящему внутри трубопровода 1. Трубопровод 2 заканчивается шайбой 4 с четырьмя отверстиями 3 для подачи газового потока внутрь диффузора 6. Диффузор имеет 16 отверстий 5, расположенных равномерно по его поверхности. Воздух, проходя через отверстия 5, интенсивно перемешивается с 4 газовыми потоками за счет ударного взаимодействия с ними. Большая

часть образовавшейся газозадушной смеси выходит из огневого отверстия 11 и попадает в основную зону горения. Меньшая часть потока (около 5%) проходит через 8 отверстий 13, просверленных по окружности конфузора 12 в камеры 7, где снижает свою скорость и выходит через кольцевую щель 9, образованную шайбой 8 и цилиндрической частью смесителя 10. Таким образом, вокруг основного фронта горения создается кольцевое пилотное пламя, предохраняющее его от срыва. Срыв пламени с огневого отверстия горелки наступает только в случае, когда скорость выхода газозадушной смеси из кольцевой щели начинает превышать нормальную скорость распространения пламени. Горелка не имеет стабилизатора фронта пламени по отношению к проскоку, т.к. не рассчитана на расходы отбросных газов, намного меньше номинальных.

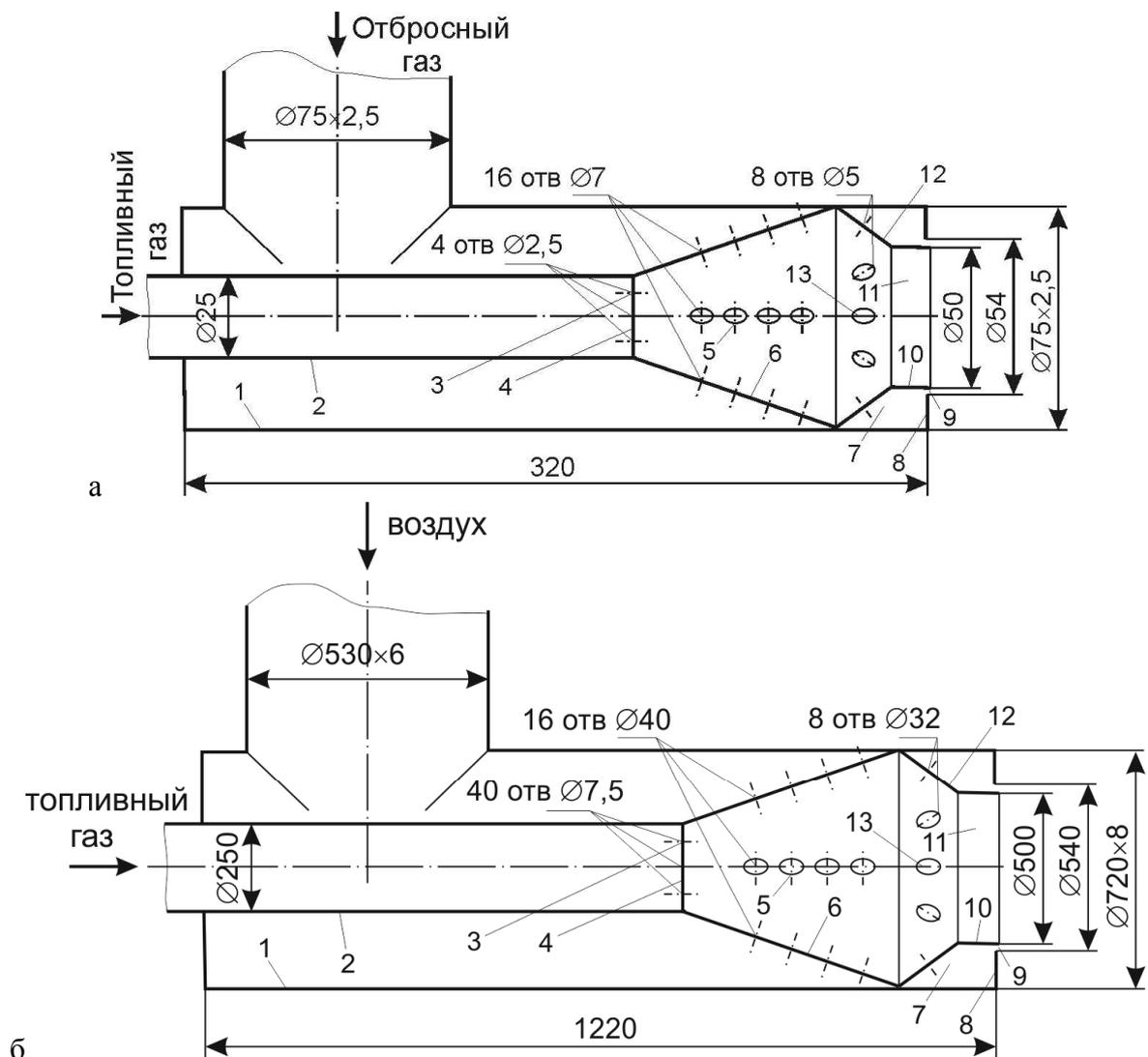


Рис. 4.4 Конструкция и ориентировочные размеры горелочного устройства с широким диапазоном регулирования избытка выбросов и пилотным стабилизатором: а – для объектов с малым расходом газа, б – для энергетических газоиспользующих объектов

Во время испытания горелки на минимальных расходах газа и выбросов наблюдались проскок пламени и продолжение горения внутри смесителя. Это показывает, что даже при небольших скоростях газа и выбросов смеситель данной конструкции обеспечивает создание гомогенной газозвушной смеси аналогично конструкциям инжекционных горелок. По этой причине горелочные устройства рассмотренной конструкции (рис. 4.4б) могут быть использованы также в процессах нестехиометрического сжигания топлива на стадиях дожига ступенчатого и ярусного горения для ГТУ ТЭЦ и котлов-утилизаторов. Создание гомогенной газозвушной смеси при повышенных избытках воздуха приводит к повышению константы скорости реакций термоокисления всех горючих компонентов при общем пониженном (по сравнению с пламенной зоной инжекционных горелок) температурном уровне процесса горения. Как следствие горелки предложенной конструкции обеспечивают низкий химический недожог, аналогично инжекционным горелкам, но, в отличие от них, при низком выходе оксидов азота. Кроме того, они, как и обычные дутьевые горелочные устройства, не имеют принципиальных ограничений по производительности.

Разработана также горелка с более широким диапазоном работы по коэффициенту избытка выбросов, проскок пламени внутри которой принципиально исключен [207]. Горелочное устройство содержит воздушный короб, в котором проходит газоподающая труба. Короб имеет закрытый торец с выходными каналами в виде трехгранных призм, причем их грани открыты и образуют выходное сопло. Газоподающая труба имеет отражатель. При работе горелочного устройства воздух из короба поступает внутрь трехгранных призм и выходит в виде встречных соударяющихся струй. В результате взаимодействия струй образуется результирующая турбулентная струя, в зону формирования которой поступает газ из газоподающей трубы. На выходе из нее образуется короткий интенсивный факел.

Проведено также испытание опытной дутьевой горелки, работающей с повышенным коэффициентом избытка выбросов и стабилизацией за счет закрутки газозвушной смеси и интенсивной рециркуляции продуктов сгорания к корню факела, разработанной в Ленгипроинжпроекте на базе серийной горелки ГНП [276].

Исследования проведены в интервале коэффициентов избытка выбросов $\alpha = 1,1 - 3,8$. В качестве примера на рис. 4.5 представлены результаты исследований горелки с закруткой воздушного потока при $\alpha = 2,7$. Испытания горелки с кольцевым пилотным стабилизатором подтверждают подобный механизм стабилизации факела при $\alpha > 2$, хотя структура факела имеет ряд отличий, наиболее существенным из которых является отсутствие центральной зоны рециркуляции продуктов горения.

Результаты свидетельствуют о неравномерности распределения температур, локальных коэффициентов избытка выбросов и концентраций оксидов азота по факелу. Можно выделить зону наиболее интенсивного горения с локальными значениями $\alpha = 1,0-1,1$; зоны по краям факела с $\alpha = 1,5$ и выше, которые наиболее разбавлены вследствие диффузии выбросов из окружающей среды и поступления в эти зоны меньшего количества топлива; зону рециркуляции раскаленных продуктов горения. Длина зоны рециркуляции уменьшается с увеличением α .

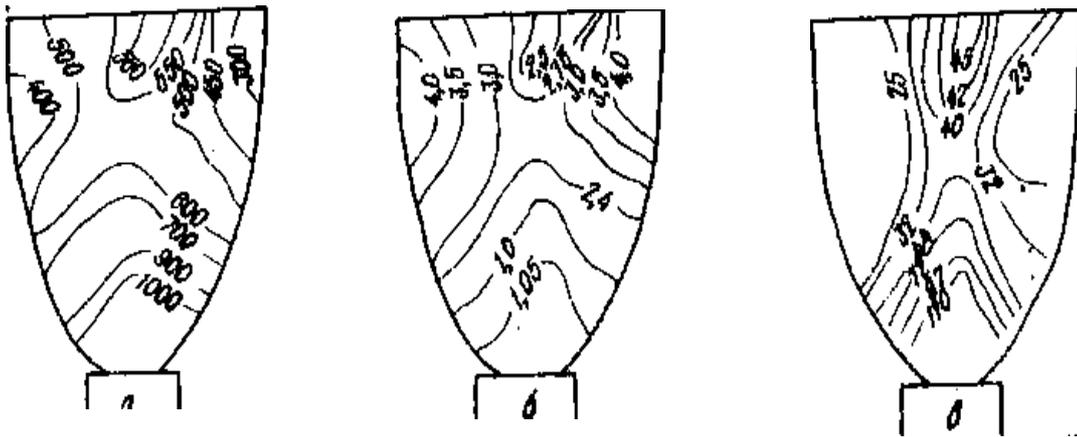


Рис. 4.5. Результаты стендовых испытаний горелочного устройства с закруткой воздушного потока при $\alpha = 2,7$: а – изотермы, б – локальные избытки выбросов в факеле, в – локальные концентрации оксидов азота

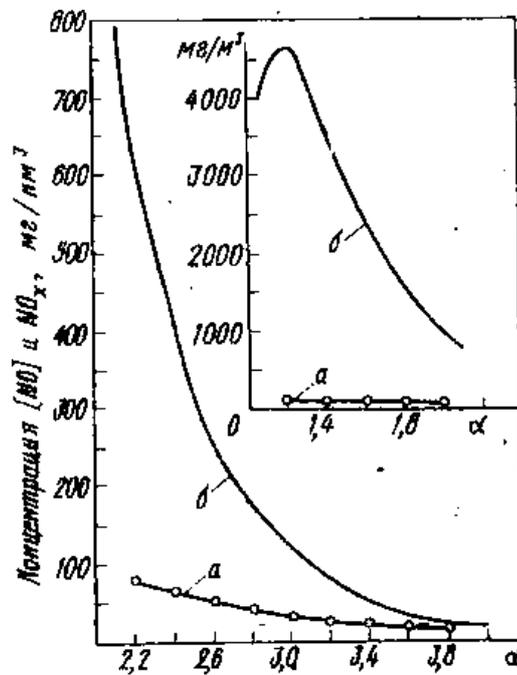


Рис.4.6. Действительные (а) и равновесные (б) концентрации оксидов азота

Результаты анализа кривых распределения локальных коэффициентов избытка выбросов по факелу приводят к аналогичному выводу, что и рассмотрение кривых распределения

температур: увеличение α равносильно разбавлению основной зоны горения факела, хотя при любом возможном значении α в пламени существует зона горения со стехиометрическим соотношением газа и выбросов. Осредненные по основной зоне значения локальных α при режимах $\alpha > 2,5$ равны 1,9...2. Крайние зоны факела имеют разбавление в 4-5 раз против стехиометрического. Горение в этих зонах поддерживается только за счет энергии, выделяемой основной зоной факела. Зона рециркуляции также сильно разбавлена и продукты горения в ней имеют невысокую температуру. Поэтому с увеличением α стабилизирующее действие зоны рециркуляции снижается.

Таким образом, в структуре пламени горелки, работающей с $\alpha > 2$, можно выделить основную зону о содержании газа и выбросов и значениями $\alpha < 2$; рециркуляции раскаленных продуктов горения к корню основной зоны; низкотемпературную зону о максимальными избытками выбросов и зону завершения горения.

При возрастании α происходит уменьшение размеров зоны, в которой может происходить самопроизвольное распространение пламени. Срыв пламени происходит при сокращении размеров этой зоны настолько, что выделяемой энергии недостаточно для поддержания горения в зонах с $\alpha > 2$.

Экспериментальные данные по распределению концентраций оксидов азота, в пламени показывают следующее. Образование NO_x начинается в непосредственной близости к устью горелки. Максимальные концентрации NO_x наблюдаются при максимальных температурах в зоне с близким к стехиометрическому отношению газа и выбросов. Распределение концентраций NO_x имеет явно выраженную температурную зависимость. Аналогично распределению температур по факелу можно было бы ожидать что максимальные концентрации NO_x будут неизменными при изменении α . Однако уменьшение времени контакта в этой зоне вследствие увеличения α приводит к снижению количества образовавшихся NO_x , а вместе с этим и к снижению их средней измеряемой концентрации.

На рис.4.6 приведено сравнение зависимости выхода NO_x по экспериментальным данным и изменения равновесной концентрации $[NO_x]$ по данным расчета в интервале $\alpha = 1,1 - 4,0$. Из рисунка видно, что при $\alpha = 1,1-1,3$ равновесные концентрации превышают действительные в 20 - 25 раз. При $\alpha = 2,0$ соотношение $NO_x / [NO_x]$ имеет значение 0,11, а при $\alpha = 3,73$ - приблизительно 1. Результаты экспериментальных данных показывают, что при работе горелок о большими коэффициентами избытка выбросов равновесная концентрация оксида азота $[NO_x]$ не определяется величиной calorиметрической температуры, рассчитанной по общему коэффициенту избытка выбросов. Этот фактор косвенно указывает на наличие стехиометрической высокотемпературной зоны в пламени горелки при $\alpha = 2,0...3,0$,

температура и время пребывания в которой и определяют выход оксидов азота NO_x для таких режимов.

При работе горелки в режимах, близких к срывным ($\alpha > 3,5$) действительный выход оксидов азота приближается к равновесному (рис.4.6). Возрастание концентрации NO_x в этом случае объясняется возникновением в факеле локальных высокотемпературных зон вследствие ухудшения смесеобразования. При номинальных режимах работы горелки ($\alpha \sim 2,5$) наблюдается приблизительно двукратное снижение выхода оксидов азота

Проведенные исследования позволяют уточнить структуру и механизм стабилизации пламени при работе горелок с $\alpha = 1,1 \dots 3,8$. При номинальных режимах ($\alpha = 2,5 \dots 3$) обеспечивается надежная работа горелок с достаточно высокими значениями температуры в основной зоне горения и низкими концентрациями оксидов азота ([86]). Указанные обстоятельства позволяют использовать подобные типы горелок для установок термического обезвреживания отбросных газов вследствие пониженного расхода топлива на единицу объема обезвреживаемых газов, обеспечения условий воспламенения горючих компонентов и снижения выброса оксидов азота в атмосферу. Это становится особенно важным и актуальным в последнее время, т.к. позволяет снижать выброс CO_2 и оксидов азота как парниковых газов.

На основе натуральных испытаний в производственных условиях горелочных устройств разработана методика расчета установок термообработки выбросов с использованием горелок, работающих с высокими избытками выбросов. Апробация методики проведена на НПО «Пигмент» (г. Санкт-Петербург) при обработке выбросов лакокрасочного производства с содержанием альдегидов [277], на ПО «Мелита» (г. Казань) при обработке вентиляционных выбросов с содержанием альдегидов и ваграночных газов с содержанием CO ([278]), на ПО «Тасма» при обработке выбросов с содержанием галогенов (см. гл. 5). Предлагаемая методика расчета позволяет получить значения определяющих полноту обезвреживания параметров процесса – коэффициента избытка воздуха, температурного уровня реакционной зоны и времени пребывания в ней. Исходные данные для расчета – расход отбросных газов W_a , m^3/c , и их состав, выраженный объемными долями компонентов, r_i . Методика состоит из 3 стадий: 1 – определение состава продуктов сгорания, коэффициента избытка воздуха и температуры горения, времени пребывания и размеров топочного устройства; 2 – подбор типоразмеров горелочных устройств; 3 – расчет газопроводов, воздухопроводов, дымоходов, подбор газооборудования и тягодутьевых устройств. Способы расчетов величины теоретически необходимого количества чистого воздуха V_{tf} , m^3/m^3 , для сжигания стандартного газового топлива известного состава, и необходимая для этого справочная информация, приводятся в научно-технических и учебных изданиях по газоснабжению и использованию газа, например, в

[199, 279]. При использовании вентиляционных выбросов в качестве воздуха для горения требуемый расход топливного газа W_f зависит от вида и содержания загрязнителя в составе отбросных газов и определяется в соответствии с рекомендациями, приведенными в разд. 2.5.4, по одному из соотношений (2.177, 2.178, 2.179, 2.180, 2.181).

При обработке газов с низким содержанием кислорода ориентировочная величина $\alpha = 1,05 \dots 1,2$. Если отбросные газы используются в качестве воздуха для горения, то для уменьшения потребления топлива следует принимать α до $2,5 \dots 3$.

Объем топки:

$$V_k = \sum_{i=1}^N W_i Q_i / [q_v] \text{ м}^3, \quad (4.11)$$

где W_i , Q_i – соответственно расход, $\text{м}^3/\text{с}$ и теплота сгорания, $\text{кДж}/\text{м}^3$, топливного газа или (и) отбросных газов, содержащих горючие вещества; $[q_v]$ – допустимое тепловое напряжение топочного объема, $\text{кВт}/\text{м}^3$; N – количество видов горючих газов.

При содержании горючих токсичных загрязнителей в отбросных газах менее $50 \dots 100 \text{ мг}/\text{м}^3$ величину Q можно рассчитывать по обычным соотношениям для топливного газа (см., например, [199, 279]. При более высоком содержании подобных загрязнителей необходимо вводить уточнения по приведенным в приложении П.3 формулам (П.3.3...П.3.5).

Значения $[q_v]$ для прямоточных конструкций топок рекомендуется принимать не более $200 \text{ кВт}/\text{м}^3$. Для циклонных топок эта величина может быть увеличена в $4 \dots 5$ раз.

Как было отмечено в разд. 2.5.4, температура зоны горения является одним из трудно определяемых параметров. Поэтому для ее надежного определения необходимо изучение опытных данных для разрабатываемых конструкций или типов топок. При отсутствии надежных данных ее можно ориентировочно оценить по соотношению:

$$t_{cm} = \eta_{pr} t_c, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4.12)$$

где η_{pr} – пирометрический коэффициент, значение которого принимают для неэкранированных неизолированных топок в пределах $0,75 \dots 0,85$, для экранированных в пределах $0,5 \dots 0,8$, для неэкранированных изолированных - в пределах $0,8 \dots 0,9$; t_c – calorиметрическая температура горения.

При содержании горючих загрязнителей более $100 \dots 150 \text{ мг}/\text{м}^3$ необходимо принять во внимание долю их участия в процессе горения (потребление кислорода, выделение теплоты реакции и т.д.) и влияние на все его параметры, в т.ч. и на температуру пламенной зоны, и определять величину t_c по формуле (П.3.11).

Необходимое время пребывания органических токсичных соединений в зоне реакции при $t_{cm} = 700 \dots 1000^{\circ}\text{C}$ определяется по эмпирической формуле, учитывающей опыт исследований и апробаций систем термообработки [67, 192, 194]:

$$\tau_{sj} = 25[1 - (t_{cm}/1060)], \text{ с.} \quad (4.13)$$

По найденной величине τ_{sj} производят проверку достаточности принятого ранее объема топки:

$$V_k \geq \tau_{sj} W_{fG} (273 + t_{cm}) \cdot (273 K_{fil}) \text{ м}^3, \quad (4.14)$$

где K_{fil} – коэффициент заполнения топки продуктами сгорания, значение которого можно принимать от 0,7 для вертикальных прямоугольных до 0,95 для циклонных топок; W_{fg} – расход дымовых газов, $\text{м}^3/\text{с}$.

При содержании загрязнителей менее $200 \text{ мг}/\text{м}^3$ величину W_{fg} подсчитывают по обычным выражениям подсчета объемов продуктов сгорания природного газа, а при значительных концентрациях горючих загрязнителей – по выражению:

$$W_{fG} = W_f (V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}) / R_f \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.15)$$

где V_{CO_2} , $V_{\text{H}_2\text{O}}$, V_{N_2} , V_{O_2} – объемы соответствующих компонентов продуктов сгорания, отнесенные к 1 м^3 горючей смеси топлива и загрязнителей, определяемые по формулам (6...9) Приложения 3; R_f – доля топлива в горючей смеси, определяемая по выражению (4) Приложения 3.

По уточненному объему топки находят эквивалентный диаметр D_{eq} , а из него – длину (высоту) l (h) топчного устройства:

$$D_{eq} = 0,8 \sqrt[3]{V_k} \text{ м}, \quad (4.16)$$

$$l = (2,0 \dots 2,3) D_{eq} \text{ м}, \quad (4.17)$$

$$h = (1,7 \dots 2) D_{eq} \text{ м} \quad (4.18)$$

По расходу газового топлива подбирают размер горелочного устройства, необходимое газооборудование и рассчитывают диаметры газопроводов, а по расходу дымовых газов находят размеры дымоходов, дымовой трубы и при необходимости – дымососа.

4.3 Полуэмпирическая модель образования автослоя в процессах сепарации частиц зо́лы на элементах пористого слоя из сеточных (тканых) материалов.

От условий формирования автослоя на сетчатом тканом материале зависят степень проскока и режимы работы фильтра в целом. Чтобы не учитывать влияние нестационарности процессов фильтрации, в существующих расчетных моделях, рассмотренных выше, принимается, что концентрация пыли в выбросах ничтожно мала. Однако в реальности низкая концентрация пыли приводит к прямо противоположному эффекту: начальный период становится очень длительным, а формирование автослоя – процессом, лимитирующим степень очистки. Образование автослоя может не влиять на фильтрацию в другом крайнем случае – при очень большой концентрации взвешенных частиц. Тогда автослой сформируется очень быстро, и дальнейший процесс осаждения может быть близок к стационарному. Однако это не реализуемый на практике вариант, т.к. потребуется почти сразу же регенерировать фильтровальный материал. На практике встречаются промежуточные ситуации, которые, в зависимости от параметров дисперсной части и дисперсионной среды, в той или иной степени сочетают признаки крайних вариантов.

В данной работе задача моделирования образования автослоя решается с использованием результатов опытного изучения процессов фильтрации. Отсев, который, как было установлено в предыдущих разделах, является основным способом удержания на препятствии частиц промышленной пыли среднего и крупного размера (5...300 мкм), в пористой среде представляет собой весьма сложный процесс. На чистых ячейках тканых сит, имеющих размер порядка 100x100...200x200 мкм (хотя свободное сечение частично перекрыто препятствиями – рис. 3.17), классифицируются только частицы крупного размера порядка 75...300 мкм и частицы очень мелкого диапазона, непосредственно контактирующие с препятствиями вследствие зацепления, инерции, диффузии, электростатического притяжения. Одновременно частицы диапазона (~5...50 мкм) проскакивают через клетки (рис. 3.18, рис. 3.19).

По мере работы плотность, ρ , и толщина, δ , слоя пыли увеличиваются (что можно проследить по фотоснимкам на рис. 3.19), и сопротивление фильтра растет. Со временем клетки могут быть настолько плотно перекрыты пылевыми мостиками, что из-за высокого перепада давления на фильтре пыль начнет загоняться в поры между нитями. Регенерация должна проводиться до наступления такой ситуации. На практике принято останавливать работу фильтров на регенерацию при увеличении начального сопротивления в 2 раза, что можно считать окончанием действия фильтрации.

Начальный размер свободного сечения ячеек и темп их последующего перекрытия являются стохастическими характеристиками. На эффективность осаждения пыли фильтром влияют все стохастические и детерминированные факторы системы. Соответственно этому параметры автослоя (толщина, плотность, проницаемость, укрывистость и др.), будучи стохастическими величинами, являются еще сложными функциями свойств материала дисперсных частиц. Поэтому для составления нестационарной модели процесса формирования автослоя на тканом материале необходимо введение упрощений и использование эмпирических данных.

С целью упрощения условно разделяем процесс на 2 этапа – формирования первичного автослоя, и его дальнейшего нарастания до останова на регенерацию. Признаком завершения первого этапа будем считать перекрытие ячеек, с сопутствующим ему частичным покрытием поверхности ткани и соответствующим увеличением сопротивления фильтра. На втором этапе с ростом толщины, плотности и снижением проницаемости автослоя перепад давления на фильтре возрастает до величины, при которой система должна быть остановлена на регенерацию [280].

На каждом из этапов масса пыли dm , кг, удаляющаяся вследствие фильтрации за время $d\tau$, с, из потока с постоянным расходом W , м³/с, и концентрациями до и после фильтра C_b , C_e , кг/м³, может быть подсчитана как

$$dm = W (C_b - C_e) d\tau = W \Delta C d\tau \quad (4.19)$$

При этом каждому из этапов соответствуют свое характерное время τ и свои параметры процесса. Изменение концентрации пыли в потоке ΔC , кг/м³, зависит от всех стохастических и детерминированных факторов, влияющих на эффективность фильтрации пыли. Значение C_b принимается постоянным. Значение C_e , по опытным сведениям, составляет в начале процесса фильтрации при заправке чистого сеточного каркаса около $0,7C_b$, регенерированной – около $0,3C_b$. В конце процесса формирования автослоя $C_e < 0,1C_b$, а в конце фильтрации перед регенерацией $C_e < 0,005C_b$. В тех случаях, когда процесс формирования автослоя может считаться недолгим, зависимость ΔC от времени можно принять прямо пропорциональной, и брать в расчетах среднюю величину ΔC . Для чистой сетки она составит около 60% C_b , для регенерированной – около 80% C_b .

В модели первого этапа процесса фильтрации необходимо отразить характер изменения скорости заполнения пылью свободного сечения ячеек f_{cell}^{fr} , м², на 1 м² поверхности фильтра f_{tot} , м², ($F_{cell}^{fr} = f_{cell}^{fr} / f_{tot}$, м²/м²) и, соответственно, живого сечения поверхности

фильтра $F^{fr} = F_{cell}^{fr}$, $\text{м}^2/\text{м}^2$. В начале процесса фильтрации площадь запыления $F_{cell}^{dust} = f_{cell}^{dust} / f_{tot}$, $\text{м}^2/\text{м}^2$, увеличивается медленно вследствие проскока пылинок через ячейки ткани. По мере образования «мостиков» на клетках степень осаждения возрастает, и скорость заполнения пылью ячеек $dF_{cell}^{dust} / d\tau$ увеличивается вплоть до их перекрытия, т.е. до завершения этапа формирования первичной структуры автослоя. До этого момента производная $dF_{cell}^{dust} / d\tau$ растет с уменьшением площади свободного сечения ячеек

$$F_{cell}^{fr} = F_b^{fr} - F_{cell}^{dust} \text{ м}^2/\text{м}^2, \quad (4.20)$$

где $F_b^{fr} = (1 - z) F_{cell}$, $\text{м}^2/\text{м}^2$ – относительная начальная площадь свободного сечения межклеточных ячеек ткани; z – коэффициент начального заполнения ячеек (препятствиями в чистой сетке и «равновесной» запыленностью после регенерации); F_{cell} , $\text{м}^2/\text{м}^2$ – номинальная площадь ячеек на 1 м^2 поверхности фильтра f_{tot} .

Площадь ячеек на 1 м^2 сетки определяется как $F_{cell} = 100N \cdot b \cdot h$. Количество ячеек N на $0,01 \text{ м}^2$ сетки, а также расстояния в свету между нитями основы b , м, и утка h , м, рассчитываются по данным о структурных характеристиках соответствующих видов тканого каркаса:

$$N = (\Pi_0 - 1) \cdot (\Pi_y - 1); b = (0,1 - \Pi_0 \cdot d_p) / (\Pi_0 - 1) \text{ м}; h = (0,1 - \Pi_y \cdot d_p) / (\Pi_y - 1) \text{ м}, \quad (4.21)$$

где Π_0 , Π_y – плотность сетки по основе и утку, выражаемая числом нитей на 100 мм ; $d_p = A\sqrt{T} / 31,6$, м – расчетный диаметр нити; A – коэффициент, который для фильтровальных тканей может быть принят $1,25$; $T = M/L$, $\text{мг}/\text{м}$ – текс нити; M , мг , и L , м – масса и длина нити.

Начальное живое сечение межниточной ячейки новой сетки составляет в среднем, как показывает изучение различных видов тканых материалов, от 90% для стеклоткани до $50 - 80\%$ для других материалов из натуральных и искусственных волокон, металлической проволоки. Это позволяет определить начальную площадь свободного сечения F_b^{fr} и свободный (эквивалентный) размер ячеек как долю их номинального размера z . По опытным данным, для новых тканей из натуральных и синтетических волокон, исключая стеклянные, металлические и керамические, можно принимать $z \approx 0,25 \div 0,45$. Для тех же тканей после множества регенераций с учетом «равновесной» запыленности $z \approx 0,7 \div 0,8$. Для чистых тканых сеток из стеклянных, металлических и керамических элементов, можно принимать $z \approx 0,5 \div 0,8$, с учетом «равновесной» запыленности – $0,6 \div 0,9$.

Наряду с этим, при описании процесса фильтрации с использованием определенных выше постоянных (средних) значений параметров скорость увеличения запыленной

поверхности фильтра оказывается равномерной. Для обеспечения физической корректности математического описания процесса необходимо принять, что до момента завершения образования автослоя в ячейках производная $dF_{cell}^{dust}/d\tau$ изменяется обратно пропорционально $(F_b^{fr} - F_{cell}^{dust})$. Необходимо также учесть, что изменение скорости запыления, при прочих равных условиях, должно быть одинаковым для фильтров с любой площадью поверхности. Поэтому в составляемой математической модели в качестве расходной характеристики используем нагрузку на единицу площади поверхности фильтрующего материала, т.е. расход, отнесенный к площади всей поверхности фильтра f_{tot} , m^2 , называемый также «скоростью фильтрации» W/f_{tot} , $m^3/(m^2c)$.

Принимаем также во внимание стохастический характер процесса осаждения частиц пыли на препятствии. Как было показано в предыдущих разделах работы, (отсев, классификация). В таком случае стохастический характер процесса фильтрации при прочих равных условиях будет проявляться в основном через совокупность сочетаний размеров частиц и ячеек сита – тканого материала. Поэтому в качестве параметров, отражающих стохастичность процесса, в модели используются характеристики дисперсного состава пыли и размер межниточных ячеек сетки. Дисперсный состав представлен через медианный диаметр частиц D_m и дисперсию σ , а размер ячеек – через их эквивалентный диаметр:

$$D_{eq} = \sqrt{bh} \quad (4.22)$$

Введение рассмотренных выше допущений и эмпирических параметров процесса уже позволяет представить зависимость $dF_{cell}^{dust}/d\tau$ в приближенном к реальному процессу виде. С их учетом математическая модель первого этапа оседания пыли на новой и регенерированной ткани может быть представлена в виде линейного дифференциального уравнения первого порядка

$$\frac{dF_{cell}^{dust}}{d\tau} = \frac{W\Delta CD_m\sigma}{f_{tot}\delta\rho D_{eq}} (F_b^{fr} - F_{cell}^{dust})^{-1}, c^{-1}. \quad (4.23)$$

Соотношение

$$f_{tot}\delta\rho D_b^{eq}/(W\Delta CD_m\sigma) = \tau_{f1} \quad (4.24)$$

представляет собой временной параметр первого этапа фильтрации τ_{f1} , с, отражающий влияние на степень осаждения основных характеристик потока, частиц и фильтрующей пористой среды. Он равен времени, которое необходимо для образования автослоя толщиной δ , м, и плотностью

ρ , кг/м³, на ячейках размером D_b^{eq} , м, при изменении концентрации (при движущей силе, концентрационном напоре) ΔC , кг/м³, диспергированных частиц с характеристиками D_m , м, и σ , в потоке с расходом W , м³/с, и при нагрузке W/f_{tot} , м³/(м²с). Запишем выражение (4.23) в виде:

$$dF_{cell}^{dust} / d\tau = 1 / \left[\tau_{f1} \left(F_b^{fr} - F_{cell}^{dust} \right) \right], \text{ с}^{-1}. \quad (4.25)$$

Пределы интегрирования определяются из условия, что этап формирования первичной структуры автослоя с перекрытием ячеек $F_{cell}^{dust} = F_b^{fr}$ завершается за время τ_1 :

$$\int_0^{F_b^{fr}} \left(F_b^{fr} - F_{cell}^{dust} \right) dF_{cell}^{dust} = \int_0^{\tau_1} d\tau / \tau_{f1}, \quad (4.26)$$

$$\tau_1 = \tau_{f1} \left(F_b^{fr} \right)^2 / 2 = f_{tot} \delta\rho D_{eq} \left(F_b^{fr} \right)^2 / \left(2W \Delta C D_m \sigma \right), \text{ с}. \quad (4.27)$$

За это время происходит частичное запыление поверхности нитей фильтрующей ткани. Как показывают опытные исследования, площадь запыления f_{tis1}^{dust} , м², приходящаяся на 1 м² общей площади ткани ($F_{tis1}^{dust} = f_{tis1}^{dust} / f_{tot}$), не превышает 0,25. В целом масса пыли, уловленная на первом этапе, определится как

$$m_1 = f_{tot} \delta\rho \left(F_b^{fr} + F_{tis1}^{dust} \right), \text{ кг}. \quad (4.28)$$

Полученные выражения позволяют также определять изменение концентрации пыли в потоке ΔC и степень очистки выбросов для различных моментов времени τ в период с начала фильтрации до перекрытия ячеек автослоем. Расчеты по выражению (8) показывают, что при рекомендуемых производителями фильтров каталожных скоростях фильтрации от 0,005 м/с для мелких частиц до 0,05 м/с для частиц среднего размера и концентрации менее 10⁻³ кг/м³ время завершения формирования первичной структуры автослоя τ_1 имеет порядок суток и часов. Следовательно, этот этап будет влиять на качество фильтрации в целом и должен учитываться в расчетах. Для крупных частиц (например, пыль процессов деревообработки) или при концентрации загрязнителя более 10⁻³ кг/м³ (например, зола в продуктах сгорания пылевидного топлива, торфа) значение τ_1 имеет порядок минут. Очевидно, в таких случаях необходимости в учете этапа формирования первичной структуры автослоя нет.

На втором этапе, с момента перекрытия ячеек, скорость запыления площади $F_{tis2}^{dust} = f_{tis2}^{dust} / f_{tot}$, м²/м², поверхности сеточного каркаса становится приблизительно постоянной:

$$dF_{tis2}^{dust} / d\tau = \text{const}. \quad (4.29)$$

В соответствии с данными опытных исследований, с этого момента приращение скорости запыления начинает замедляться и приостанавливается, а приращение массы осаждаемой пыли dm происходит в основном за счет увеличения плотности слоя ρ и нарастания его толщины δ . Ввиду малости прироста толщины слоя и достаточно длинного периода работы фильтров между регенерациями зависимость $\delta=f(\tau)$ без особой погрешности может рассматриваться как линейная. Увеличение плотности автослоя является сугубо стохастической величиной, и зависимость $\rho = f(\tau)$ для тех или иных конкретных случаев может принимать любой вид. Однако при отсутствии внешних полей отсутствуют и процессы, которые могли бы вызвать какие-либо преференции при упаковке частиц в автослой. Поэтому наиболее вероятно прямо пропорциональное увеличение плотности слоя ρ в зависимости от τ .

При условии равномерного распределения по поверхности фильтра массу оседающей из потока пыли можно представить как

$$dm = \rho dV = \rho \delta f_{tot} dF_{tis2}^{dust} \text{ кг}, \quad (4.30)$$

где V – объем оседающей пыли, м^3 ; δ – толщина слоя, оседающего на поверхности ткани, м; ρ – плотность осевшего слоя пыли, $\text{кг}/\text{м}^3$.

С учетом (4.19)

$$dF_{tis2}^{dust} = [W\Delta C / (f_{tot} \delta \rho)] d\tau \text{ м}^2/\text{м}^2. \quad (4.31)$$

С пределами интегрирования по площади запыления от F_{tis1}^{dust} до 1, и по времени от τ_1 до τ_2 , где τ_2 – период между регенерациями, с, получим продолжительность второго этапа

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = (1 - F_{tis1}^{dust}) f_{tot} \delta \rho / (W\Delta C) \text{ с}. \quad (4.32)$$

Здесь временной параметр фильтрации второго этапа τ_{f2} , с, определяется соотношением

$$\tau_{f2} = f_{tot} \delta \rho / (W\Delta C). \quad (4.33)$$

Это время образования на поверхности фильтровальной ткани автослоя толщиной δ , м, и плотностью ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$, при нагрузке W/f_{tot} , $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{с})$ и концентрационном напоре в потоке ΔC , $\text{кг}/\text{м}^3$. Согласно с данными проведенных опытных исследований, при одинаковой скорости фильтрации толщина и плотность оседающего слоя δ , ρ в основном зависят от размеров, слипаемости и морфологии пыли. В данной работе были подвергнуты испытаниям пыли средне-мелкие (D_m около 10 мкм) средней слипаемости ($P \approx 250$ Па) и компактной формы (коэффициент формы $\Phi \approx 0,9$), а также крупные (D_m около 50 мкм) неслипающиеся ($P < 100$ Па) и не совсем компактной формы ($\Phi \approx 0,7$), что, в принципе, охватывает большинство видов пылей по указанным свойствам. Для установления параметров пылей, характеристики которых

выходят за пределы рассмотренных, необходимы специальные исследования для выявления вида функциональных зависимостей $df/d\tau = f(\Phi, P)$.

Результаты исследований позволяют провести эмпирическую оценку пределов изменения параметров δ , ρ . Плотность ρ осевшего слоя исследованных видов пылей изменялась в период между регенерациями от 0 начале фильтрации до 0,40...0,65 от насыпной плотности ρ_a в конечном состоянии. Толщина слоя пыли также изменяется в процессе от 0 до максимального значения при остановке на регенерацию. По опытным данным, конечная толщина слоя осевшей компактной пыли среднего размера и средней слипаемости имеет порядок 10^{-3} м, причем по объему автослоя частицы распределены неравномерно. Принимая зависимость изменения ρ от времени прямо пропорциональной, можно брать в расчетах ее среднюю величину, которая находится в пределах соответственно от 20% до 32,5% ρ_a .

Вместе с тем из опыта эксплуатации тканевых фильтров известно, что в при постоянной нагрузке их сопротивление в период между регенерациями растет приблизительно пропорционально времени работы. Это позволяет упростить задачу и принимать в расчетах среднее значение произведения $\delta \cdot \rho$. Принимая среднюю величину $\rho_m = (0,2...0,325)\rho_a$, кг/м³, и оценочную величину $\delta_m = 10^{-3}$ м, получим окончательное выражение для расчета продолжительности периода между регенерациями:

$$\tau_2 = (2 \div 3,25) \cdot 10^{-4} \rho_a f_{tot} (1 - F_{tis1}^{dust}) / (W \Delta C) + \tau_1, \text{ с.} \quad (4.34)$$

При этом необходимо иметь в виду, что толщина слоя является стохастической величиной, которая может не совпадать с отдельными наблюдениями, а ее оценка может изменяться с накоплением статистических данных.

Таким образом, на основе результатов опытного изучения процессов фильтрации поставлена и решена задача моделирования фильтрации в пористом слое с тканым материалом. В результате решения задачи формирования автослоя на тканом материале получены выражения, которые позволяют находить основные характеристики, необходимые для рационального конструирования и эксплуатации фильтрационных очистных систем – степень осаждения взвеси и продолжительность периода между регенерациями. В существующих на настоящее время методиках проектирования и контроля систем фильтрации воздуха, производственных выбросов или других газов (см., например, [153, 158, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292] и др.) такие расчеты отсутствуют. Требуемые характеристики определяются на практике по паспортам заводов-изготовителей и результатам испытаний систем после их сооружения.

5 Экономическая оценка предотвращенного ущерба от вредных компонентов выбросов ТЭС. Анализ рисков инвестиций в теплоисточники. Использование результатов исследований в проектировании и учебной работе

5.1 Расчеты предотвращенного ущерба от снижения выброса NO_x, НМЛЮС и СО. Общие положения

Расчет предотвращенного ущерба проводится по Временной методике [293]. Методика предназначена для использования, в т.ч., при согласовании программ и мероприятий, направленных на снижение (предотвращение) негативных последствий хозяйственной деятельности для окружающей природной среды. Методикой рекомендуется осуществлять определение предотвращенного ущерба отдельно по видам природных ресурсов. По атмосфере как по природному ресурсу основным фактором, определяющим величину предотвращенного экологического ущерба, является снижение выбросов загрязняющих веществ.

Предотвращенный экологический ущерб определяется на территории каждого субъекта России исходя из объемов снижения отрицательного воздействия и величины показателя удельного экологического ущерба, наносимого единицей приведенной массы загрязнения по конкретному виду природных ресурсов и объектов. Показатели удельного экологического ущерба корректируются с учетом индекса-дефлятора по отраслям промышленности, устанавливаемого Минэкономикой России на рассматриваемый период.

В показателе удельного экологического ущерба от воздействия атмосферных загрязнений на состояние окружающей среды и экономику регионов и природопользователей, учтено множество негативных проявлений. Это повышение заболеваемости населения, последствия загрязнения водных ресурсов и почв атмосферными выпадениями, снижение урожайности сельскохозяйственных культур и биопродуктивности природных комплексов, дополнительные затраты на ремонт из-за преждевременного износа основных фондов и покрытий, на очистку территорий, стирку одежды и т.д., а также потери, связанные с социальной сферой.

Эколого-экономическая оценка ущерба может представлять как фактические от ухудшения, так и предотвращаемые (возможные) материальные и финансовые потери и убытки от улучшения качественных и количественных параметров атмосферного воздуха.

По Временной методике, предотвращенный экологический ущерб от выбросов загрязняющих веществ в атмосферу представляется как оценка в денежной форме возможных отрицательных последствий от выбросов загрязняющих веществ, которых в рассматриваемый

период времени удалось избежать в результате проведения комплекса воздухоохраных мероприятий.

Приведенная масса загрязняющих веществ M - условная величина, позволяющая сопоставлять вредность или эколого-экономическую опасность совокупностей загрязнений от разных промышленных объектов. Укрупненная оценка величины предотвращенного ущерба от выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух может проводиться для одного крупного источника, группы источников или для региона в целом. При укрупненных оценках предотвращенного ущерба (либо оценке прогнозируемой величины предотвращенного ущерба) для территории в целом все источники могут рассматриваться как единый “приведенный” источник. В этих случаях для определения величины предотвращенного ущерба предлагается использовать усредненные расчетные значения экономической оценки ущерба на единицу приведенной массы атмосферных загрязнений (удельные ущербы) для основных экономических районов РФ.

$$Y_{\text{прг}}^a = Y_{\text{удг}}^a \times (M_1^a - M_2^a) \times K_{\text{э}}^a \times J_{\text{д}} \quad (5.1)$$

где: $Y_{\text{удг}}^a$ - величина экономической оценки удельного ущерба от выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, (далее – показатель удельного ущерба) для $г$ -го экономического района РФ, руб./усл. т; M_1^a, M_2^a - приведенная масса выбросов загрязняющих веществ соответственно на начало и конец расчетного периода в рассматриваемом регионе, усл.т; $K_{\text{э}}^a$ - коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха территорий экономических районов России; $J_{\text{д}}$ - индекс-дефлятор по отраслям промышленности.

Показатель удельного ущерба от выброса 1 условной тонны загрязняющих веществ в атмосферный воздух $Y_{\text{удг}}^a$ определяется отношением суммарной оценки величины нанесенного ущерба от выбросов загрязняющих веществ за определенный период времени к приведенной массе выбросов загрязнений, имевших место в тот же период времени в рассматриваемом $г$ -ом регионе (с учетом массы трансграничного переноса):

$$Y_{\text{удг}}^a = \sum_{i=1}^N Y_i^a / M_i^a \quad (5.2)$$

где Y_i^a – экономическая оценка нанесенного ущерба по i -му фактору от выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в $г$ -ом регионе, тыс.руб./год; M_i^a – приведенная масса фактических выбросов загрязняющих веществ за отчетный период времени в $г$ -ом регионе, тыс.усл.т./год.

Значения этого показателя для Поволжского и Северо-Западного экономических районов РФ, представленные в таблице 1 Приложения 2 Временной методики, составляют соответственно 49,5 и 48,4 руб/усл. т в ценах 1998 г.

Приведенная масса загрязняющих веществ рассчитывается для $к$ -го конкретного объекта или направления атмосфероохранной деятельности в регионе:

$$M_k^a = \sum_{i=1}^N m_i^a K_{zi}^a \quad (5.3)$$

- для $г$ -го региона (района) в целом:

$$M_r^a = \sum_{k=1}^k M_k^a \quad (5.4)$$

где: m_i^a - масса выброса в атмосферной воздух i -го загрязняющего вещества или группы веществ с одинаковым коэффициентом относительной эколого-экономической опасности, т/год; K_{zi}^a - коэффициент относительной эколого-экономической опасности i -го загрязняющего вещества или группы веществ (таблица 2 Приложения 2 Временной методики); i – индекс загрязняющего вещества или группы загрязняющих веществ; N – количество учитываемых групп загрязняющих веществ.

Далее будут рассмотрены оценки предотвращаемых (возможных) потерь и убытков от улучшения качественных и количественных параметров атмосферного воздуха, а также оценки снижения убытков предприятий вследствие уменьшения платы за выбросы за счет внедряемых мероприятий. Так как структура платы за выбросы (доля сверхлимитной платы) как правило, конфиденциальна, в дальнейших расчетах принято, что предприятия оплачивают весь выброс по базовому нормативу в пределах установленных лимитов. В соответствии с [294] дифференцированные ставки платы определяются умножением базовых нормативов платы на коэффициенты, учитывающие экологические факторы. Коэффициенты к базовым нормативам платы, учитывающие экологические факторы, природно-климатические особенности территорий, значимость природных и социально-культурных объектов, установленные для

отдельных регионов, составляют, по таблице 4 [295] для Поволжского экономического района РФ 1,9, для Северо-Западного – 1,5.

Базовые нормативы платы за выбросы, сбросы загрязняющих веществ в окружающую природную среду, размещение отходов, приведенные в таблице – таблица 5.1, разработаны в соответствии с [Постановлением](#) Правительства Российской Федерации от 28 августа 1992 года N 632 "Об утверждении Порядка определения платы и ее предельных размеров за загрязнение окружающей среды, размещение отходов, другие виды вредного воздействия". [Постановление](#) Правительства РФ от 28.08.1992 N 632 признано незаконным (недействительным) [решением](#) Верховного Суда РФ от 28.03.2002 N ГКПИ 2002-178. После этого оно признано утратившим силу в связи с изданием Приказа МПР РФ от 12.04.2002 N 187. Однако в соответствии с [определением](#) Конституционного Суда РФ от 10.12.2002 N 284-О [Постановление](#) Правительства РФ от 28.08.1992 N 632 сохраняет силу и подлежит применению судами, другими органами и должностными лицами как не противоречащее [Конституции](#) РФ с точки зрения разграничения компетенции между Федеральным Собранием и Правительством РФ. [Письмом](#) МПР РФ от 27.11.2000 N ВП-61/6349 сообщается о введении с 1 января 2001 года на территории Российской Федерации коэффициента индексации платы за загрязнение окружающей природной среды в размере до 94 раз.

Таблица 5.1. Базовые нормативы платы за выброс в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников

(в ред. [письма](#) Минприроды РФ от 18.08.1993 N 03-15/65-4400)

N пп.	Наименование загрязняющих вредных веществ	Норматив платы за выброс 1 т загрязняющих вредных веществ (руб.)	
		в пределах допустимых нормативов выбросов	в пределах установленных лимитов (временно согласованных нормативов выбросов)
3.	Акролеин	550	2750
15.	Ангидрид фталевый (пары, аэрозоль)	165	825
19.	Ацетон	50	250
95.	Кислота уксусная	275	1375
165.	Спирт метиловый (метанол)	35	175
166.	Спирт этиловый (этанол)	3	15
185.	Углерода окись (углерода оксид)	5	25
187.	Фенол	5500	27500
190.	Формальдегид	5500	27500
202.	П-Хлорфенол	1650	8250

В соответствии со ст. 15 Закона Российской Федерации «О федеральном бюджете на 2002 год» от 30.12.2001 г. № 194-ФЗ, принятого Государственной Думой 14.12.2001 г. коэффициент

индексации платы за загрязнение окружающей природной среды на 2002 г. составляет 110.9 по сравнению с 1992 г. Наконец, постановлением Правительства РФ N 344 от 12 июня 2003 г. [296] были установлены современные нормативы платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ (таблица 5.3).

По ст. 3. «Индексация ставок отдельных видов платежей на 2013 год», п.3 [297], нормативы платы за негативное воздействие на окружающую среду, установленные Правительством РФ в 2003 году и в 2005 году, применяются в 2013 году с коэффициентом соответственно 2,20 и 1,79.

Таблица 5.2 Коэффициенты экологической ситуации и значимости состояния атмосферного воздуха и почвы территорий экономических районов РФ

Экономические районы Российской Федерации	Коэффициенты экологической ситуации и экологической значимости	
	атмосферного воздуха	почвы
Северо - Западный	1,5	1,3
Центральный	1,9	1,6
Поволжский	1,9	1,9

Таблица 5.3. Нормативы платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными источниками (Приложение N 1 к постановлению Правительства РФ от 12 июня 2003 г. N 344 в ред. постановлений Правительства РФ [от 01.07.2005 N 410](#), [от 08.01.2009 N 7](#))

(рублей)

	Наименование загрязняющих веществ	Нормативы платы за выброс 1 тонны загрязняющих веществ	
		в пределах установленных допустимых нормативов выбросов	в пределах установленных лимитов выбросов
1.	Азота диоксид	52	260
2.	Азота оксид	35	175
3.	Акролеин	68	340
15.	Ангидрид фталевый (пары, аэрозоль)	21	105
18.	Ацетон	6,2	31
92.	Кислота уксусная	35	175
159.	Спирт метиловый (метанол)	5	25
160.	Спирт этиловый (этанол)	0,4	2
179	Углерода окись (углерода оксид)	0,6	3
180	Углерод четыреххлористый	3,7	18,5
181	Фенол	683	3415
183	Фтор трихлорметан (фреон-11)	0,2	1
184	Формальдегид	683	3415
195.	п-Хлорфенол	205	1025

5.1.1 Комплексная обработка выбросов помещений КРУЭ с галогенсодержащим загрязнителем.

Комплексность обработки выбросов с галогенсодержащим загрязнителем необходима для обеспечения надежности их радикального обезвреживания с учетом глобальности действия галогенсодержащих загрязнителей и очень высокого значения потенциала глобального потепления одного из них – гексафторида серы SF_6 . С целью надлежащей обработки галогенсодержащих вентиляционных выбросов была создана система обезвреживания [298], сочетающая предварительную хемосорбционную обработку выбросов для связывания галогена с металлом и конденсацию образовавшегося продукта с выводом конденсата из системы, циклонную фильтрацию [299] и термообработку отфильтрованного газофазного остатка выброса [300] на заключительной стадии. Проведенные опытные исследования данной комплексной системы показали, что исходные галогенсодержащие соединения практически полностью (в пределах точности химического анализа) вступают в реакцию с нагретым до оптимальной температуры процесса t_{opt} оксидом металла. Процесс происходит в контактном аппарате в режиме фонтанирования адсорбента. Выделяющийся в виде радикала галоген в основном связывается с металлом, обнаружен также галогенводород с содержанием до 10 %. Итоговая реакция:



где Hal – галоген, R – радикал, Me – металл, $\sum Org$ – органический остаток.

Парообразные галогены металла и галогеноводород выводятся из аппарата вместе с другими газами, парами и уносом адсорбента. Далее тяжелые пары галогенов конденсируются, прошедшая конденсатор взвесь фильтруется, а органический остаток подается на сжигание. Анализы показали отсутствие на выходе из системы фосгена и исходных галогенсодержащих соединений.

Для определения температуры t_{opt} , обеспечивающей высокую степень отделения галогена при деструкции исходных галогенсодержащих соединений и его максимальное связывание с металлом, были проведены предварительные исследования по схеме, представленной на рис. 5.1.

Контактный узел установки работал в режиме, близком к модели идеального вытеснения. Он состоял из трех последовательно соединенных колонок 1 диаметром 32 мм, в которых пространство высотой 100 мм между сетками 2 наполнялось порошкообразным оксидом железа Fe_3O_4 [301]. Наполнитель нагревался электроспиралью 3 в пределах от 150 до 550°C, с контролем температуры на выходе из колонок платино-платинородиевыми термопарами 4 типа ТПП и потенциометром 5 марки ПП-63. Воздух с расходом 0,0003 - 0,001

м³/с подавался нагнетателем 6 по трубе 7 со штуцером 8. Расход воздуха измерялся коллектором 9 с микроманометром 10. В качестве загрязнителей к штуцеру 8 из колбы 11 подводились фреон-30 (метилхлорид МХ CH_2Cl_2) или другое галогенорганическое вещество, в количестве до 0,5 г/м³ ([302]). Подача продукта регулировалась подогревателем 12 и контролировалась по давлению в колбе U-образным манометром 13. Для определения концентрации галогена, поступающего с воздухом в колонки, колба периодически взвешивалась. После колонок воздух с продуктами реакции (3) разделялся на жидкую и газовую фазы в узле конденсации 14, состоящем из холодильника и конденсатоотводчика, при температуре хладагента (рассола) около 0°C. После конденсатора конденсат удаляли, а неконденсирующуюся часть подавали на сжигание в горелку по [207], работающую устойчиво с коэффициентом избытка выбросов $\alpha=2\dots 6$.

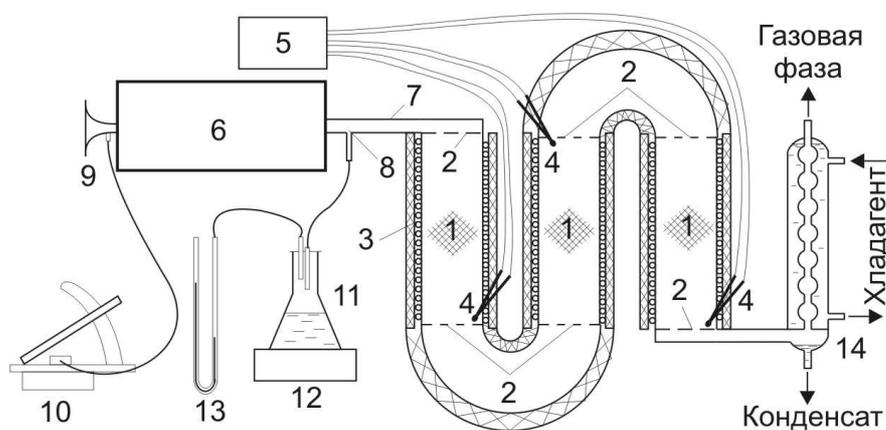


Рис. 5.1. Схема установки для исследования деструкции хлорсодержащих соединений

Для оценки механизма реакции галогенорганического вещества с оксидом железа в условиях опыта ряд испытаний был продублирован. В слой добавляли гидрохинон в количестве 2% (мас.), который является ингибитором радикальных реакций, интенсивно поглощающим активные центры. При одинаковых температурных режимах в присутствии гидрохинона скорость образования конденсата заметно падала. Это показало, что некоторые из стадий реакции (5.5) осуществляются по радикально-цепному механизму. Использованное количество гидрохинона было незначительно и не могло сказаться на стадии галогенирования оксида металла, т.к. реакция гетерогенная, и активные центры в ней уничтожаются самой поверхностью твердой фазы. Следовательно, радикальный механизм характерен для стадии, идущей в объеме. После контакта с нагретой поверхностью исходное соединение галогена попадает в пространство между частицами оксида железа, где и происходит термодеструкция.

Увеличение объема этого пространства должно способствовать интенсификации процесса обработки в целом.

В ходе испытаний анализировался состав продуктов реакции (5.5). Рентгеноструктурный анализ твердой фазы из колонок на установке ДРОН-2 показал наличие галогенидов двух- и трехвалентного железа в кристаллогидратном состоянии при отсутствии оксигалогенидов, а также значительное количество гидроперекисных соединений железа. Спектроскопический элементный анализ проб жидкой фазы из конденсатора показал содержание более 50% ионов трехвалентного железа и галогена, около 10% ионов водорода при незначительном содержании (0... 0,4%) углерода. Для конденсата также характерна интенсивная реакция с оксидом алюминия на поверхности фольги при комнатной температуре и рассеянном солнечном освещении, что свидетельствует о высоком содержании галогенида железа. Несущественное содержание в пробах углерода указывает на практическое отсутствие химического недожога в виде галогенированных углеводородов. Поэтому содержание галогена в газовой фазе определялось по галогениду водорода.

В результате предварительных исследований установлены оптимальные температурные пределы процесса, соответствующие степени очистки по галогену 98...99,7%. Для полной термодеструкции испытанных соединений достаточно довести температуру наполнителя до ~175...210°C, однако при этом существенна концентрация галогена в газовой фазе. Галоген как продукт разложения начинает интенсивно связываться с железом с ~250...300°C. На это указывало наблюдаемое до ~450°C падение концентрации галогенида водорода HCl в газовой фазе, а затем она начинала расти с повышением температуры.

Для проверки работоспособности системы обработки выбросов по изобретению [209] был испытан узел предварительной адсорбционной обработки в фонтанирующем режиме полидисперсного адсорбента. Он представлял собой контактный аппарат цилиндрической конфигурации с диаметром цилиндрической части 200 мм. В контактный аппарат поступали вентиляционные выбросы, содержащие соединения галогенов. При испытаниях в различных режимах фонтанирования в зависимости от гидравлических и теплотехнических параметров расход отбросных газов поддерживался в пределах ~ 0,0004...0,004 м³/с, температура изменялась от 200 до 400°C. контроль температуры производился термопарами ТПП с потенциометром ПП-63. В качестве фонтанирующего реагента использовался порошкообразный оксид железа со средним размером частиц 0,1 мм. В процессе контакта происходило разложение галогенсодержащих компонентов, образовывались органические соединения и летучие галогениды железа, которые в парообразном виде выводились из контактного аппарата и направлялись в узел конденсации ([303]). В последнем, при

температуре около 273К, производилась конденсация галогенидов железа. При этом достигалось улавливание галогенсодержащих соединений перед пламенной зоной. Неконденсирующиеся органические соединения в газообразном виде подавались из конденсатора в узел сжигания с горелкой по [206], работающей устойчиво с коэффициентом избытка выбросов $\alpha=1,05\dots3,5$. Тепло продуктов сгорания после горелочного устройства частично использовалось для подогрева конической части контактного аппарата. Расходные характеристики газового потока определялись в соответствии с методикой, изложенной в ([304]).

Для внедрения системы комплексной обработки выбросов проведены стендовые испытания с двумя типоразмерами аппаратов фонтанирующего слоя. Схемы установок представлены на рис. 5.2, рис. 5.3.

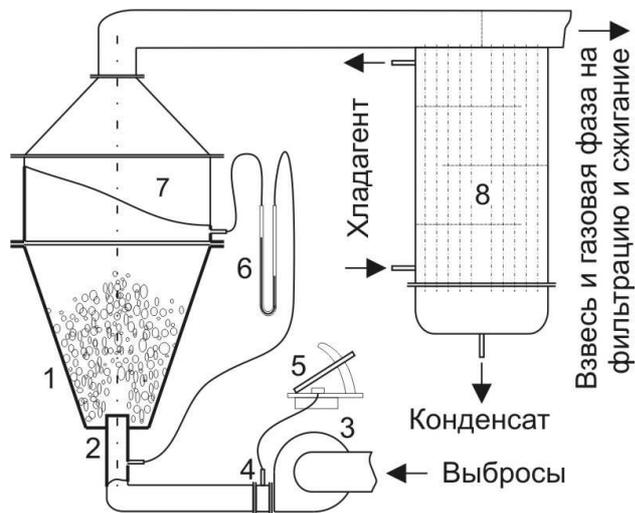


Рис. 5.2. Схема стендовой установки комплексной обработки выбросов с крупномерным узлом контакта(диаметр сопла 75 мм)

Испытания с крупномерным узлом контакта имели целью установить принципиальную возможность обработки выбросов в промышленных масштабах. Узел контакта, предназначенный для обработки выбросов в фонтанирующем слое, выполнен в виде конического аппарата 1 высотой $H=650$ мм, с диаметрами нижнего d и верхнего D оснований 250 и 600 мм соответственно, углом раскрытия конуса $\theta \approx 30^\circ$, диаметром сопла $d_0=75$ мм. В контактном аппарате находился фонтанирующий полидисперсный адсорбент, состоящий из предварительно подогреваемой шамотной крошки размером от 0,6 до 3 мм, импрегнированной порошкообразным оксидом железа с размером частиц менее 0,1 мм. Выбросы подавались через сопло 2 с диаметром $d_0=75$ мм вентилятором 3. Расход определялся диафрагмой 4 и микроманометром 5, перепад давления в слое - U-образным манометром 6. Продукты реакции (3) из конической части аппарата направлялись через переходную секцию 7 по трубопроводу в

узел конденсации 8, где фиксировалось наличие или отсутствие конденсации галогениды железа, что требовалось для установления возможности вывода из системы галогенсодержащих соединений до пламенной зоны. Неконденсирующиеся органические соединения после циклонной фильтрации газового потока подавались на сжигание в горелочное устройство.

В отличие от предыдущей установки, работа контактного узла была организована по модели идеального перемешивания, ввиду сложности нагрева неподвижного наполнителя в колоннах большого размера. Одним из преимуществ фонтанирующего режима является равномерный прогрев материала. Кроме того, в предыдущих испытаниях было установлено, что увеличение пространства между частицами должно интенсифицировать идущую в объеме стадию термодеструкции галогенсодержащего реагента.

Фонтанирование эффективно и для гетерогенной стадии процесса – галогенирования оксида железа. Ее интенсивность зависит от дисперсности частиц. Полифракционный материал с существенной долей тонкодисперсных частиц размером 100 мкм и менее псевдоожигению поддается плохо, а организация режима фонтанирования затруднений не вызывает. Для нахождения параметров фонтанирования полифракционной засыпки и корректировки расчетных выражений, а также надлежащих температурных режимов работы системы обработки выбросов, был испытан контактный узел меньшего типоразмера (рис. 5.3).

Слой, составленный из фракций шамотной крошки с размерами частиц от 0,063 до 0,63 мм, импрегнированных порошкообразным оксидом железа с размерами частиц ~100 мкм, вначале продувался комнатным воздухом. Определены скорости потока в начале и конце фонтанирования, сопротивление фонтанирующего слоя. Пика давления не обнаружено. Причина в отмеченной выше особенности аппарата. Как и в предыдущей конструкции аппарата с фонтанирующим слоем, с целью обеспечения энергосбережения сопло, установлено на 25 мм выше основания конуса. Это обеспечило инжектирующий эффект на уровне среза сопла и приобретение частицами кинетической энергии на начальном участке.

Проведено опробование работы стендовой установки при различных концентрациях галогенсодержащих соединений в обрабатываемых газах. Адсорбент – импрегнированная оксидом железа полидисперсная шамотная крошка с размером частиц до 0,1 мм, помещался в коническую часть 1 контактного аппарата. Через сопло 2 диаметром $d_0=25$ мм вентилятором 3 в нее подавались выбросы. Через патрубок 7 в фонтанирующий слой периодически добавлялся оксид железа. Продукты реакции (3) направлялись в узел конденсации 10. Хладагент – рассол с температурой около 0°C. С этим достигалось удаление содержащих галоген соединений до пламенной зоны. Неконденсирующиеся продукты в газообразном виде подавались в узел фильтрации с целью предотвращения попадания уноса адсорбента и жидкой фазы в зону

горения. Конструкция циклона-фильтра 14 позволяет интенсификацию циклонной обработки и предотвращение абразивного износа. Важность последнего в том, что унос твердой фазы представляет собой тонкодисперсную шамотную пыль с коэффициентом абразивности свыше $10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$. Отфильтрованный газ направляется через трубопровод 15 в узел сжигания, оборудованный горелочным устройством 16.

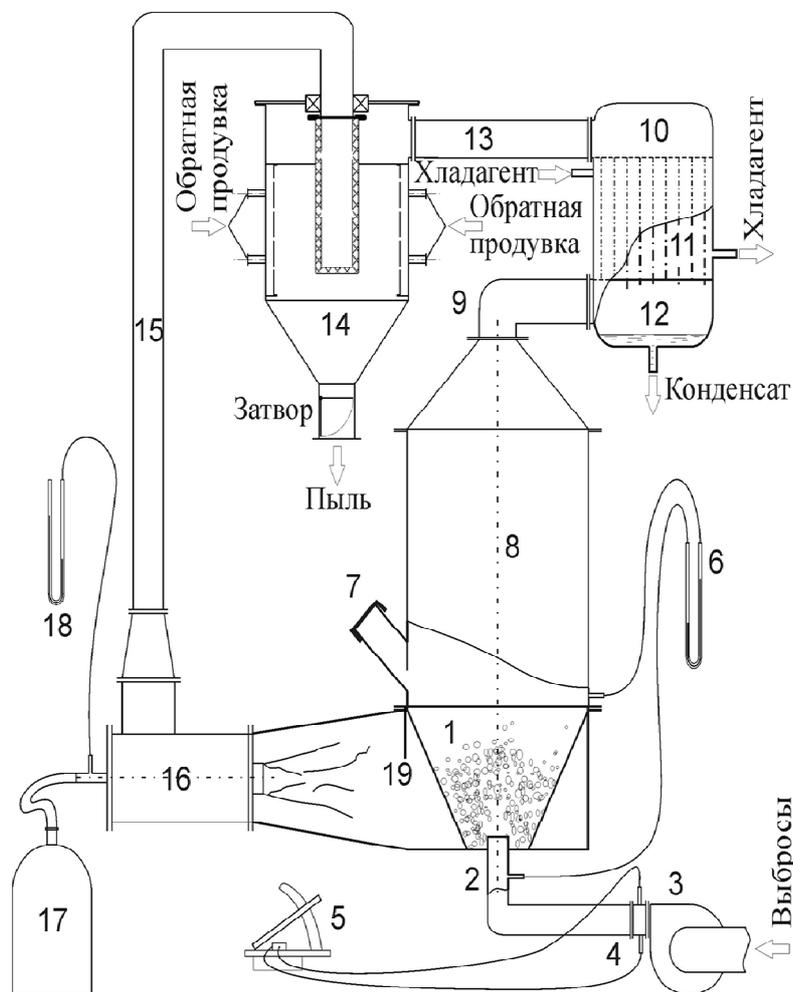


Рис. 5.3 Схема стендовой установки комплексной обработки выбросов с узлом контакта меньшего типоразмера (диаметр сопла 25 мм)

Температура в зоне контакта изменялась от 200 до 400°C. В ходе испытаний отбирались пробы твердой фазы из аппарата и жидкой фазы из конденсатора, анализировался их состав. Определялось также содержание галогена в продуктах сгорания по галогениду водорода. Анализ твердой фазы проводился методом γ -резонансной (ЯГР) спектроскопии в лаборатории КНЦ РАН. Спектры снимались на мёссбауэровском спектрометре, изготовленном на базе анализатора импульсов NTA-1024. В пробах, отобранных при температуре 300°C и выше на фоне исходных спектров γ - и α -оксидов железа фиксировались линии трехвалентного галогенида железа в количестве до 1,5...2% от общего содержания Fe. Анализ жидкой фазы в ходе исследований проводился стандартными методами химического анализа в химической

лаборатории ПО «ТАСМА». Элементный анализ проб конденсата подтвердил отсутствие углерода при содержании до 5% ионов трехвалентного железа, до 10% ионов галогена при незначительном содержании (следы) ионов водорода. Анализ газообразной фазы на содержание галогенидов водорода проводился фотометрически с использованием специфических для каждого галогена реакций по действовавшим на момент анализа официальным методикам (например, представленным в [305]). Посредством анализа продуктов сгорания выявлены оптимальные температурные пределы обработки выбросов в контактном аппарате, соответствующие степени очистки по галогену не ниже 98%.

В целом проведенные исследования позволили установить оптимальное сочетание стадий и параметров обработки выбросов с галогенсодержащими веществами, обеспечивающих их надежное и полное обезвреживание. Таким образом, разработанный и защищенный авторским свидетельством способ обработки выбросов с загрязнителями глобального действия, успешно прошел испытания. Внедрение рекомендованного Государственным докладом «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2007 г.» [5] способа комплексной очистки галогенсодержащих выбросов было признано целесообразным для ОАО «Тасма-Холдинг» (Казань) при выполнении госзаказа по продукции специального назначения (письмо № 146/200 ОАО «Тасма-Холдинг» от 08.06.2009). В соответствии с технологическим регламентом процесса, потери на 1000 п.м продукции составляют: ПХФ 3,469 кг, ацетона 38,581 кг, метанола 50,688 кг. Расход сушильного агента (воздух) 1,361 м³/с, время процесса подслоирования 1000 п.м. продукции 3,33 часа, годовая загрузка порядка 600 ч. Концентрации обезвреживаемых компонентов выбросов: ПХФ 212,4 мг/м³, ацетона 2362,1 мг/м³, метанола 3103,3 мг/м³. В соответствии с Временной методикой определения предотвращенного экологического ущерба [293] произведен расчет экономической эффективности за счет снижения валового выброса загрязнителей после комплексной обработки выбросов (таблица 5.4)

Таблица 5.4.

Предотвращенный ущерб после комплексной обработки выбросов

Вещество	Формула	Концентрации загрязнителя до/ после обработки, 10 ⁻⁹ т/м ³	Интенсивность обрабатываемого технологического выброса м ³ /с	Валовой выброс до/после обработки т/год
Технологический выброс (письмо № 146/200 ОАО «Тасма-Холдинг» от 08.06.2009)				
19.Ацетон	CH ₃ COCH ₃	2362,1/0	1,361	6,944/0
165.Спирт метиловый (метанол)	CH ₃ OH	3103.3/0	1,361	9,123/0
202.П-хлорфенол	C ₆ H ₄ ClOH	212.4/ 0	1,361	0,625/0

Таблица 5.4, продолжение

Снижение валового выброса загрязнителя т/год	Базовый норматив платы в пределах установленных лимитов, руб/т	Коэффициент экологической ситуации и экологической значимости	Коэффициент индексации платы за загрязнение на 01.01.2001	Плата в пределах установленных лимитов, по тарифам на 01.01.2001 руб/т	Экономия предприятием вследствие снижения платы за выбросы, руб/год
6,944	250	1,9	94	44650	310050
9,123	175	1,9	94	31255	285139
0,6245	8250	1,9	94	1473450	920169
Итого экономия за счет снижения загрязнения технологического выброса 1515358					

С пересчетом по ценам 2009 г. (коэффициент индексации 4,6) экономия для предприятия вследствие снижения платы за выбросы составила 6,9 млн руб.

5.1.2 Фонтанирующий слой в процессе хемосорбции галогенсодержащих загрязнителей вентиляционных выбросов помещений КРУЭ ТЭС

Уже при существующем на сегодня уровне технического развития, опыта проектирования и эксплуатации аппараты с фонтанирующим слоем могут найти применение в ряде вспомогательных циклов ТЭС. Рассмотрим далее возможность их использования при обработке вентиляционных выбросов помещений КРУЭ (комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией). Гексафторид серы SF_6 – галоген, внесенный РКИК ООН в список загрязнителей глобального действия, оказывающих интенсивный парниковый эффект. В недавнем прошлом ОАО РАО «ЕЭС России», отмечая наличие выброса элегаза тепловыми электростанциями, рассматривало в отчетности подразделений по парниковым газам только CO_2 вследствие существенно превосходящих объемов выбросов последнего, достигающих у разных компаний до 98-99% общего выброса парниковых газов. Такие резюме еще недавно были вполне приемлемы для внутреннего пользования, чего нельзя утверждать теперь после вступления в ВТО. В ЕС по причине того, что из шести парниковых газов в списке РКИК ООН элегаз имеет максимальный потенциал глобального потепления (ПГП), в 24 тыс. раз превосходящий CO_2 , на законодательном уровне запрещено любое использование элегаза, кроме КРУЭ, утечки которых жестко контролируются. Несмотря на это, ежегодный прирост SF_6 в атмосфере планеты составляет порядка 8%. Так что по показателю изменчивости гексафторид серы также превосходит все остальные загрязнители, что вызывает повышенное

внимание к нему надзорных органов европейских стран – членов ВТО. Поэтому разработка средств, обеспечивающих обезвреживание выбросов, содержащих элегаз, становится теперь все более актуальной.

Установки с фонтанирующим слоем могут быть применены здесь как хемосорбционные аппараты для создания условий улавливания адсорбентами гексафторида серы и прохождения на их поверхности соответствующих химических реакций с образованием легко выделяемых из газовой фазы конечных продуктов. Наличие шести атомов фтора у химического соединения в любом случае является показателем его потенциальной активности, однако широко распространена информация о почти полной химической инертности SF_6 . Вместе с тем ряд других гексафторидов обладает высокой реакционной способностью. Поэтому для подбора надлежащего способа обработки выбросов необходим подробный анализ физико-химических свойств элегаза.

В нормальных условиях SF_6 – бесцветный газ с плотностью, близкой к $6,5 \text{ кг/м}^3$ ($146,05 \text{ кг/моль}$). При -63° он конденсируется в бесцветное твердое вещество, которое может быть расплавлено под давлением. Параметры тройной точки: $t = -50,8^\circ \text{C}$, $P = 230 \text{ кПа}$. Давление насыщенных паров в интервале от -40 до $+30^\circ \text{C}$ увеличивается от 340 кПа до $2,64 \text{ МПа}$. Критические давление, температура, удельный объем: $P_{кр} = 3,83 \text{ МПа}$, $T_{кр} = 318,7 \text{ К}$, $v_{кр} = 1,98 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{моль} = 1,36 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$. Следовательно, несмотря на большую плотность, газ переходит в конденсированное состояние при весьма низкой температуре и повышенном давлении, что приводит к нецелесообразности его улавливания из выбросов путем непосредственной конденсации. Энтальпия и энтропия образования -1219 кДж/моль и $291,6 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$.

Достаточно изучены вопросы, касающиеся диэлектрических свойств гексафторида серы. Его способность к образованию отрицательного молекулярного иона SF_6^- при облучении электронами с низкой энергией (до $\sim 2 \text{ эВ}$) связана с большим сечением захвата электронов. Ион может диссоциировать до низших фторидов, представляющих собой химически более активные и вредные вещества, что наблюдается при использовании элегаза в качестве изолятора.

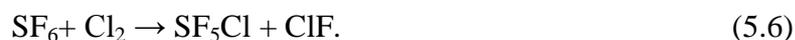
Известно также, что гексафторид серы хорошо растворим в нитрометане и слабо растворим в воде ($\sim 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ H}_2\text{O}$). Расчетные значения энтальпии и энтропии растворения SF_6 в воде равны $-20,5 \text{ кДж/моль}$ и $-172 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$. По данным [306], несмотря на низкую растворимость, гексафторид серы образует в воде газовый гидрат состава $SF_6 \cdot 17H_2O$. Его можно получить при медленном нагнетании SF_6 в воду до давления $\sim 0,5 \text{ МПа}$. При 0° гидрат $SF_6 \cdot 17H_2O$ образуется, как и многие другие газовые гидраты, в виде белых кристаллов, похожих на снежную массу. В соответствии с фазовой P, T - диаграммой, в интервале температуры от -9

до +15°C газовый гидрат гексафторида серы содержит ~17 моль H₂O на 1 моль SF₆. Упругость пара при 0°C равна 80 кПа. Теплоты образования гидрата из воды и льда равны соответственно -124 и +21,5 кДж/моль. При температуре 14°C и давлении 2 МПа имеется точка сосуществования 4 фаз (гидрат SF₆ – жидкость, обогащенная водой – жидкость, обогащенная SF₆ – пар). По данным этих же авторов, существует твердый клатрат соединения Дианина с гексафторидом серы, имеющий состав, близкий к 6C₁₈H₂₀O₂·1,79SF₆. Его температура плавления около 165°C, плотность 1,3 т/м³.

При термической диссоциации гексафторида серы образуется газовая смесь S, F, e, SF₆, SF₄, SF₃, SF₂, SF, S₂, F₂, S⁺, S²⁺, S⁻, F⁺, F⁻. По расчетным данным составов продуктов термической диссоциации в интервале температуры от 1000 до 20000 К и давлении от 0,1 до 2 МПа, при 1000 К мольная доля атомарного фтора и тетрафторида серы составляет 6·10⁻⁶, а молекулярного фтора – 10⁻⁶. Вплоть до 1400 К мольная доля SF₆ еще близка к единице (0,992). Быстрая диссоциация с появлением новых частиц S, SF₂, SF, S₂ начинается при 2000 К. При 3000 К гексафторида серы уже не существует, а продукты распада начинают обогащаться ионами S⁺, F⁺, F⁻, S⁻. При 5000 К исчезает SF₄, а при 7500 К – остальные молекулы, и плазма состоит из электронов, серы и фтора в атомарном и ионизированном состояниях.

Авторы работы [306] рассматривают еще ряд процессов, в которых возможны реакции фторирования с участием элегаза. Остановимся на двух из них, которые представляют интерес для поставленной задачи.

В условиях электрического разряда, происходящих в процессе эксплуатации КРУЭ, образуются низшие фториды серы SF₂, S₂F₂, химическая активность которых значительно выше исходного гексафторида серы. В реакциях гексафторида серы с хлором и кислородом под действием высокочастотного разряда обнаружено образование SF₅Cl с выходом 1,97·10⁻³ моль/ч по суммарному уравнению:



Реакция SF₆ + O₂ (отношение 1,32: 1) приводит к образованию SOF₄ с выходом ~0,305·10⁻⁶ моль/с (степень превращения 18%) при скорости газового потока 1,69·10⁻⁶ моль/с. Механизмы реакций не установлены из-за обилия продуктов диссоциации и ионизации SF₆ под воздействием электрического разряда.

Таким образом, в выбросах при эксплуатации КРУЭ оказываются и низшие фториды серы, которые имеют более высокую реакционную способность. В общей схеме реакций, возможно, с радикальным механизмом, они могут служить поставщиками активных центров.

Особое значение имеют реакции при повышенных температурах. Известно, что натрий подвержен воздействию гексафторида серы уже при 247 °С (константа скорости реакции $K = 2,23 \cdot 10^7 \text{ м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$). При 500 °С реакция сопровождается хемолуминесценцией, наиболее вероятное объяснение которой в том, что одна из пяти стадий является экзотермической с выделением энергии, необходимой для возбуждения *D*-линии натрия:



Гексафторид серы при относительно низких температурах (180-200°С) фторирует треххлористый алюминий с выходом AlF_3 порядка 15%:



В патенте РФ № 2170699 [307] приводятся сведения о том, что при таких же температурах гамма-оксид алюминия является катализатором процессов термодеструкции и диспропорционирования, приводящих к образованию низших фторидов серы. Другие же модификации оксида алюминия неэффективны. Можно полагать, что низшие фториды серы образуются также в реакции (5.8). Тем же патентом защищен способ контактирования гексафторида серы с активированным углем при температуре порядка 100 °С, приводящий к протеканию аналогичных процессов с образованием таких же продуктов. При этом экспериментально доказывается, что катализатором служит активированный уголь. Образующиеся низшие фториды серы легко удаляются промывкой водой и/или водным раствором щелочи.

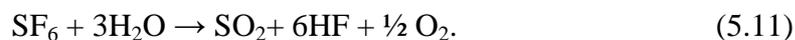
При 250°С SF_6 реагирует с SO_3 , образуя при этом сульфурилфторид с выходом ~20%:



Последний химически также неактивен, как элегаз, и по [308] имеет приблизительно в 5 раз меньший потенциал глобального потепления, однако оказывает токсическое воздействие на организм человека. Поэтому использование реакции (5.9) для рассматриваемой задачи представляется нецелесообразным.

В работе [309] сообщается о комплексной системе обезвреживания с термической и абсорбционной (ступени физической абсорбции и хемосорбции) обработкой выбросов, содержащих хладон 23, SF_6 и др. галогены. На ступени термообезвреживания, использующей

сбросной водород, проводится термоокислительный гидролиз отходов. Касательно SF₆ в [309] приведена последовательность реакций, приводящая к образованию диоксида серы:



Далее продукты промываются водой и раствором едкого кали. Для прохождения основного процесса необходимо поддерживать температуру выше 1100 °С, что может быть экономически приемлемо лишь при условии утилизации излишков энергоносителя.

В работе [306] сообщается о вдвое низшем температурном уровне реакций с участием SF₆. Ее авторами проведены исследования реакционной способности гексафторида серы касательно ряда простых веществ и их соединений, показавшие, что распространенное мнение о химической инертности SF₆ весьма условно. Методом дифференциального термического анализа (ДТА) ими было изучено 60 видов веществ – металлов, их оксидов и фторидов и установлено, что подавляющее большинство изученных металлов реагируют в интервале 500-600 °С со значительной скоростью. Особенно энергично, с воспламенением, протекают реакции с титаном и лантаноидами. Реакция с алюминием и оксидом алюминия (по-видимому, не с гамма-модификацией оксида) идет при температуре порядка 550 °С. Авторы провели расчеты с определением термодинамически наиболее выгодных реакций. Проверка термодинамических расчетов для систем металл – SF₆ получила подтверждение при подробном экспериментальном изучении условий и характера взаимодействия гексафторида серы с цинком и кадмием с использованием рентгенофазового анализа.

Термодинамическая оценка реакционной способности гексафторида серы по рядам, построенным на основе константы термодинамической стабильности [310] показывает, что SF₆ имеет потенциал достаточно активного вещества и при помощи него можно фторировать соединения, по крайней мере, молибдена, вольфрама, осмия или урана. В работе речь идет только о гексафторидах, ввиду чего авторами не рассматривались соединения низших фторидов, в которых могут участвовать более доступные и тем самым представляющие непосредственный интерес для нашей работы металлы, такие, как например, алюминий, медь, железо. Вдобавок, осмий и железо находятся в одной подгруппе, и для нашей задачи достаточно получить продукт не обязательно из высших фторидов, но легко удаляемый из газовой фазы.

Таким образом, проведенный анализ теоретических и опытных работ показывает возможность проведения хемосорбционного процесса фторирования металлов и их оксидов с целью удаления элегаза из выбросов в приемлемых по температуре и давлению условиях.

Следовательно, представленные в разделе экспериментальные исследования по обработке галогенсодержащих выбросов в фонтанирующем слое оксидов железа могут быть использованы и для обработки воздуха, содержащего элегаз, например, вентиляционных выбросов помещений с КРУЭ.

5.1.3 Анализ базовой линии и условия дополнительности по ПСО комплексной обработки выбросов помещений КРУЭ с галогенсодержащими загрязнителями

Как уже отмечалось, Сводом правил СП 90 [27] предписывается рассчитывать вентиляцию помещений КРУЭ на разбавление элегаза до предельно допустимых концентраций. Его содержание в помещении при нормальных условиях не должно превышать 0,1 % к объему воздуха (п. 10.1.73). При нарушении герметичности любого элемента элегазового оборудования аварийная вентиляция должна снижать концентрацию элегаза до ПДК не более чем за час. Ее расчетная производительность должна приниматься (п. 10.1.74) по технологическому заданию исходя из разрыва одного резервуара.

Получим соответствующие нормативному документу [27] исходные данные для проектирования комплексной установки обработки галогенсодержащих выбросов ТЭС. В воздухе помещения КРУЭ объемом 1200 м^3 при нормальных условиях может находиться до $1,2 \text{ м}^3$ гексафторида серы. Примем, что этого максимума его концентрация достигает в среднем каждый 99-ый процентиль; тогда при 7000 часах работы ячейки в год и при трехкратном воздухообмене в помещениях с КРУЭ его нормативный выброс может достигать $3,6 \cdot 7000 \cdot 0,01 = 252 \text{ м}^3/\text{год}$ или порядка 1650 кг/год . Максимальный (разовый) расчетный выброс для аварийной ситуации, соответствующий разрыву одного резервуара, может составлять порядка 10 кг/ч .

Далее показана возможность внедрения на предприятиях ОАО «Генерирующая компания» системы комплексной обработки вентиляционного выброса помещений КРУЭ, содержащего элегаз, с использованием одного из инструментов (т. наз. «механизмов гибкости», *flexibility mechanisms*), предоставляемых РКИК ООН по РКИК ООН – проекта совместного осуществления, ПСО (Joint Implementation, JI) ([311]).

По ПСО стороны, включенные в Приложение I РКИК ООН, могут оказать финансовое и технологическое содействие другим сторонам, также включенным в Приложение I, в реализации проектов сокращения (или поглощения) выбросов парниковых газов (ПГ). Сторона, в которой реализуется проект СО, называется Принимающей Стороной (ПС). На основе достигнутых в результате указанных проектов сокращений (или поглощений), оформляются разрешения на выбросы ПГ в форме единицы сокращения выбросов (ЕСВ). Ее может

использовать любая из сторон с целью подтверждения своих количественных обязательств по сокращению выбросов ПГ. При этом общий лимит на выбросы Сторон Приложения I не изменится, а будет произведена передача разрешений на выбросы между Сторонами. Вместе с тем в дальнейшем ОАО «Генерирующая компания» сможет распространять результаты внедрения по всем европейским генерирующим предприятиям, имеющим квоты выброса ПГ и жесткий контроль за использованием элегаза.

ПСО могут выполняться только при соблюдении дополненности. Для этого необходимо доказать, что сокращение выбросов было бы невозможно без предлагаемого ПСО. Доказательство должно обосновываться особенностями национальной и/или отраслевой политики, другими обстоятельствами. Они должны очевидно показывать, что уровни эмиссий по нескольким потенциальным вариантам, которые произойдут без реализации предлагаемого ПСО, будут выше, чем после его реализации.

Для этого необходимо оценить реальность сокращения выбросов, заложенную в предлагаемом ПСО, по сравнению с будущим гипотетическим уровнем выбросов, если проект не будет осуществлен. Оценка уровней выбросов потенциальных вариантов представляет собой т. наз. сценарий базовой линии. Требования к базовым сценариям весьма жесткие. Они должны быть адекватны, прозрачны, консервативны, и разрабатываться на основе утвержденных методик. Новые методики могут использоваться только после одобрения и регистрации Исполнительным советом Механизма чистого развития (МЧР), подотчетным Совецанию Сторон РКИК ООН. В рассматриваемом случае имеется возможность адаптации утвержденной методологии МЧР АМ0001/Версия 05.1 «Сжигание отбросных потоков хладона-23», действующей с 22 декабря 2006. В 2009 г. она была распространена на совместную обработку хладона и элегаза [312].

Ниже выполнен анализ четырех альтернатив проекту ПСО комплексной обработки галогенсодержащих загрязнителей вентиляционных выбросов помещений КРУЭ и выбор базовой линии на основании методологии АМ0001/Версия 05.1

Альтернатива 1: Сохранение текущей ситуации.

В соответствии с действующими в РФ на данный момент нормативными документами, количество SF₆, выбрасываемое предприятием, может достигать до 1650 кг/год, что составляет в пересчете по *GWP* около 40 тыс. тонн CO₂-экв в год. При этом допускается максимальный разовый выброс в экстремальной ситуации до 10 кг/ч (до 240 тонн CO₂-экв в час). Элегаз не оказывает токсического действия на организм человека, но при повышенной концентрации может привести к асфиксии. Гексафторид серы на сегодняшний день предприятием не утилизируется.

Такая ситуация может сохраняться и в дальнейшем, так как предприятие не нарушает никаких норм, имеет разрешение на выбросы и согласованные нормативы ПДВ для соответствующих источников. Практика эмиссии SF_6 в атмосферу является общей для России и стран, не входящих в приложение 1 РКИК ООН. В большинстве развивающихся стран выбросы SF_6 не нормируются. В РФ выбросы гексафторида серы нормируются, но плата за них не установлена, и предприятие за эти выбросы не платит. Какие-либо ограничения на выбросы парниковых газов для отдельных предприятий в России отсутствуют и в ближайшие годы не предвидятся.

Сообразно с самой методологией AM0001, в качестве базовой линии по умолчанию рассматривается сценарий сохранения текущей практики.

Основным риском для базовой линии является ограничение, которое может налагаться государством на использование газов с высоким *GWP*. Это связано с тем, что в РФ каких-либо действий по сокращению или улавливанию выброса основного ПГ из списка РКИК ООН – CO_2 , в ближайшей перспективе не предвидится. Поэтому при возникновении чрезвычайной необходимости общий выброс ПГ в РФ может быть первоначально уменьшен за счет снижения использования веществ с очень высоким *GWP*, в т.ч. и за счет SF_6 . Однако пока правительство РФ не утвердило никаких ограничений касательно веществ с высоким *GWP*, а чрезвычайные ситуации маловероятны. Поэтому соответствующие риски также ничтожно малы.

Таким образом, Альтернатива 1 может считаться наиболее вероятным сценарием базовой линии.

Альтернатива 2: Утилизация выбросов SF_6 на существующих установках.

В настоящее время предприятие не имеет установок по утилизации SF_6 .

На предприятии ООО «Завод полимеров КЧХК» [312] имеется действующая установка термообезвреживания смеси хладона-23 и SF_6 , производительность которой суммарно более чем на порядок, а по SF_6 – в 4 раза выше требуемой. Поэтому непосредственная покупка этой установки или ее проекта нецелесообразны. Использование ее схемы в качестве аналога также проблематично в силу многих причин. Прежде всего, адаптация такой установки для обработки только одного компонента – SF_6 , вместо смеси хладона-23 и SF_6 , потребует повторного выполнения всего цикла НИОКР, возможно, и с отрицательным результатом.

Сведений о более подходящих существующих установках обработки выбросов с SF_6 на настоящее время не имеется.

Учитывая сказанное, Альтернатива 2 исключается из дальнейшего рассмотрения.

Альтернатива 3: Продажа SF_6 в качестве товарного продукта

Гексафторид серы может стать товарным продуктом для генерирующего предприятия в случае наложения государством запрета на использование элегаза на ТЭС. Как уже отмечалось, наложение государственных ограничений на использование газов с высоким *GWP* маловероятно. Учитывая сказанное, Альтернатива 3 была исключена из дальнейшего рассмотрения.

Альтернатива 4: Проектная деятельность без привлечения механизма ПСО

Возможно выполнить проектную деятельность, включающую стадии НИОКР, проектирования и пусконаладки, по адаптации установки термогидролиза фторорганических соединений (ФОС) с системой очистки и нейтрализации отходящих газов по упоминавшемуся аналогу [312]. Однако, как отмечают даже разработчики этой системы, ее строительство требует значительных инвестиций, а эксплуатация установки сопряжена с существенными затратами.

Поэтому такая проектная деятельность без привлечения механизма П не принесла бы предприятию не только экономических, но и экологических или каких-либо иных преференций. Предприятие и без того не превышает ПДВ по SF_6 , а плата за выбросы не взимается. Проект не несет экологических выгод локального масштаба, поскольку SF_6 практически безвреден для атмосферного воздуха в зоне влияния конкретных ТЭС. Ограничения на выбросы парниковых газов для отдельных предприятий в России отсутствуют. Очевидно, что в таких условиях имеющиеся у предприятия средства будут направляться на развитие основного производства.

Проект не вписывается в общую практику, существующую в энергетике России. Имея разрешение на выбросы в рамках ПДВ, согласованных с государственными экологическими надзорными органами, предприятие, не заинтересовано во вложение значительных средств на утилизацию нетоксичных загрязняющих веществ, за выбросы которых не взимается плата.

Таким образом, возможность реализации Альтернативы 4 маловероятна.

В итоге вышесказанного в качестве базовой линии принимается Альтернатива 1, предполагающая сохранение текущей ситуации.

Предлагаемый проект ПСО комплексной обработки галогенсодержащих загрязнителей вентиляционных выбросов помещений КРУЭ предусматривает утилизацию практически всего объема гексафторида серы, выбрасываемого до его реализации в атмосферу. Учитывая высокое значение его потенциала глобального потепления, это приведет к значительному снижению вредного антропогенного воздействия на климатическую систему. Определенное в соответствии с актуализированными нормативами СП 90 сокращение выбросов ПГ составляет порядка 40 тыс. тонн CO_2 -экв в год в расчете на одно предприятие. При этом для

экстремальной ситуации предусматривается возможность обработки максимального разового выброса до 10 кг/ч (до 240 тонн CO₂-экв в час).

Предприятие имеет согласованные ПДВ для всех источников гексафторида серы. В настоящее время предприятие выбрасывает весь объем образующихся отходов, содержащих гексафторид серы. Утилизировать весь объем отходов на существующих установках невозможно. Возможность продаж гексафторида серы в качестве товарного продукта практически исключена. Без реализации проекта совместного осуществления предприятие продолжило бы выбрасывать в атмосферу гексафторид серы в соответствии с существующей практикой, исходя из следующих предпосылок:

1. Природоохранное законодательство РФ не требует полной утилизации выбросов гексафторида серы. Он отнесен к 4-ому классу опасности, т.е. считается практически безвредным для окружающей среды и человека.

2. Гексафторид серы относится к парниковым газам и характеризуется высоким потенциалом глобального потепления *GWP*. Однако в России каких-либо ограничений на его выброс для промышленных предприятий не предвидится.

3. Утилизация гексафторида серы сопряжена со значительными капитальными и текущими затратами, но при этом не приносит никакой экономической выгоды, за исключением потенциальной выгоды от продажи сокращений выбросов ПГ на углеродном рынке в рамках механизмов гибкости РКИК ООН. Они могут составить на одно предприятие – энергопроизводитель не менее 520 тыс. USD при существующей (2012 г.) цене в Европе 13 \$ за 1 т CO₂-экв.

4. Невозможно использовать существующие на настоящее время системы обработки выбросов с гексафторидом серы даже в качестве аналогов, т.к. они предназначены для обработки смеси газов и имеют несоизмеримо большую производительность. Поэтому для их адаптации потребовалось бы выполнение полного цикла НИОКР с непредсказуемым итогом, не исключая отрицательный результат.

5. Несмотря на то, что в РФ выбросы гексафторида серы нормируются, плата за выбросы этих веществ не установлена.

Проект не является общей практикой в России. Как правило, предприятие, имеющее согласованный ПДВ, не заинтересовано в полной утилизации выбросов. По существующей практике генерирующие предприятия производят выбросы, содержащие SF₆, не нарушая при этом российских экологических норм.

Анализ условия дополнительности проекта

С учетом представленного выше анализа альтернатив, дополнительность проекта обосновывается следующими основными аргументами:

1. Законодательство РФ не требует утилизации всего количества выбросов SF₆. Они считаются практически безвредными. Плата за них не взимается. Какие-либо ограничения на выбросы парниковых газов для отдельных предприятий в России отсутствуют и в ближайшие годы не предвидятся.

2. От утилизации всего объема выбрасываемого SF₆ предприятие не получило бы никаких существенных выгод, не считая потенциальной выгоды от продажи сокращений выбросов ПГ на углеродном рынке в рамках предлагаемого ПСО как одного из механизмов гибкости РКИК ООН.

3. В настоящее время в России общей практикой для предприятий-энергопроизводителей является согласование ПДВ для источников SF₆ и их выброс в пределах установленных лимитов. Имея разрешения на выбросы в пределах ПДВ, генерирующее предприятие, очевидно, не заинтересовано во вложении значительных инвестиций с целью полной утилизации нетоксичных выбросов, за которые не надо платить. Дополнительная утилизация галогенсодержащих соединений не приносит предприятиям никаких существенных выгод за исключением потенциальной возможности участия в будущем в проектах совместного осуществления, однако требует значительных затрат и, кроме того, опыта в этой сфере деятельности.

Следовательно, в отсутствие предложенной проектной деятельности невозможно было бы получить сокращения выбросов ПГ. Путем проведения предложенной проектной деятельности можно достичь практически полного разложения SF₆. Следовательно, в случае реализации предлагаемого ПСО, количество предотвращенного выброса SF₆ будет больше количества такового по базовой линии. Это доказывает, что проект является дополнительным, в соответствии с требованиями к доказательству дополнительности, описанными в АМ0001/Версия 05.1

Соблюдение условия дополнительности является исходной позицией предложенной проектной деятельности. Подтверждение дополнительности позволяет приступить к процедуре инициирования ПСО. Изложение всех правил составления проекта совместного осуществления имеется в свободном доступе на ресурсах РКИК ООН.

5.1.4 Обработка выбросов с косвенными парниковыми газами (НМЛОС и СО)

Предприятия, размещенные в районах старой застройки городов, чаще всего непосредственно примыкают к жилой зоне. Вентиляционные и технологические выбросы таких предприятий, содержащие НМЛОС и СО, представляют опасность здоровью людей и окружающей среде даже при невысокой концентрации токсичных компонентов как косвенные парниковые газы, способные вызывать фотооксидационные реакции с образованием соответствующих смогов и приземного озона.. С целью разработки оптимальных методов их обезвреживания были обследованы источники производственных выбросов, содержащих НМЛОС и СО, расположенных в центральной части г.г. Казани и Санкт-Петербурга. В вентиляционных выбросах производства, расположенных в г. Казани, содержалось до 180 мг/м^3 формальдегида и метанола, до 160 мг/м^3 этанола, до 240 мг/м^3 уксусной и муравьиной кислот. Интенсивность выбросов около $50000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($14 \text{ м}^3/\text{с}$). Технико-экономическое сравнение различных способов обезвреживания показало целесообразность термообработки указанных токсичных компонентов. Использование выбросов в качестве воздуха для сжигания топлива обеспечивало экономическую эффективность термообработки вследствие возможности совместного обезвреживания загрязненного воздуха с высокотемпературными выбросами углеиспользующих установок. ([313]).

Кроме практических целей, представляло интерес проверить влияние состава выбросов на теплотехнические параметры процесса горения на объектах действующего предприятия, и внести коррективы в разработанную методику расчета характеристик сжигания топлива с воздухом, содержание горючих компонентов в котором находится ниже пределов воспламенения (разд. 4.2; [314]). Испытания подтвердили работоспособность предлагаемой методики в реальных условиях, что позволило ввести ее, после окончательной корректировки эмпирического соотношения (4.13) для определения времени пребывания загрязнителей τ_{sj} в высокотемпературной зоне – важнейшего показателя полноты термоокисления, в пособие по проектированию аппаратов пылегазоочистки [58]. Расчетное увеличение суммарной теплоты сгорания при условии использования всего объема вентиляционных выбросов в топливосжигающих установках составляло 5% теплоты сгорания топлива.

Расчеты показали экономическую эффективность термообработки вентиляционных выбросов за счет предотвращенного ущерба вследствие снижения валового выброса загрязнителей (таблица 5.5).

Расчеты предотвращенного ущерба вследствие снижения валового выброса загрязнителей

Таблица 5.5.

Предотвращенный ущерб по токсическому воздействию загрязнителей с косвенным парниковым эффектом

Вещество	Формула	Концентрация до/ после обработки, 10^{-9} т/м ³	Интенсивность обрабатываемого выброса м ³ /с	Валовой выброс загрязнителя до/после обработки т/год
185.Углерода оксид	CO	2562/1125	2	11,990/5,265
165.Спирт метиловый (метанол)	CH ₃ OH	180/0	14•0,15	0,885/0
166.Спирт этиловый (этанол)	C ₂ H ₅ OH	160/0	14•0,15	0,786/0
92.Кислота уксусная	CH ₃ COOH	240/0	14•0,15	1,179/0
Кислота муравьиная	HCOOH	240/0	14•0,15	1,179/0
190.Формальдегид	HCHO	180/0	14•0,15	0,885/0

Таблица 5.5, продолжение

Снижение валового выброса загрязнителя т/год	Базовый норматив платы в пределах установленных лимитов, руб/т	Коэффициент экологической ситуации и экологической значимости	Коэффициент индексации платы за загрязнение на 01.01.2001	Плата в пределах установленных лимитов, тарифам 01.01.2001 руб/т	Экономия предприятия вследствие снижения платы за выбросы, руб/год
6,725	25	1,9	94	4465	30027
0,885	175	1,9	94	31255	27660
0,786	15	1,9	94	2679	2105
1,179	1375	1,9	94	245575	289533
1,179	1375	1,9	94	245575	289533
0,885	27500	1,9	94	4911500	4346678
Итого экономия по предприятию					4983535

С пересчетом по ценам 2009 г. (коэффициент индексации 4,6) экономическая эффективность для предприятия составила около 23 млн руб.

Выбросы производств, расположенных в г. Санкт-Петербурге, составляют до 30-60 м³/с вентиляционных выбросов, содержащих акролеин, формальдегид. Требования по содержанию перечисленных соединений в воздухе рабочей зоны и населенных мест жесткие из-за сильного

токсического действия на организм человека. Кроме того, все они могут производить косвенный и непосредственный парниковый эффект в атмосфере, хотя официально фигурируют как вещества с косвенным эффектом. По своему строению вредные компоненты состоят из углерода, водорода и кислорода. Следовательно, при сжигании они могут полностью окисляться до CO_2 и H_2O . В рассматриваемом случае выброс CO_2 не должен учитываться как выброс парниковых газов, т.к. обезвреживанию подвергаются соединения, которые сами фактически являются парниковыми.

Наиболее экономично термообезвреживание подобных выбросов с подачей их в качестве воздуха для горения в топках котлов и других топливоиспользующих установок. при помощи горелочных устройств, работающих устойчиво с повышенными коэффициентами избытка выбросов. Предельное значение α , при котором обеспечивается надежное выгорание органических компонентов, равно, по экспериментальным данным, 2...2,5. Для установки обезвреживания была использована горелка с принудительной подачей выбросов, обеспечивающая устойчивое сжигание топлива до $\alpha = 4...4,5$ ([315]). Фронт пламени стабилизируется вследствие рециркуляции раскаленных продуктов горения к корню факела. Зона обратных токов в пламени создается за счет закрутки газовоздушного потока на выходе из горелки аксиальным лопаточным завихрителем. Для обезвреживания отбросных газов могут использоваться и конструкции горелок с другими принципами стабилизации пламени, соответствующие требованию устойчивой работы с повышенными α .

В ходе исследования и дальнейшего опыта эксплуатации были подтверждены расчетные результаты, показывающие, что при концентрациях отбросных компонентов до 250 мг/м^3 их влиянием на устойчивость факела можно пренебречь. Изменение температуры горения также незначительно. Низшая теплота сгорания горючей смеси при концентрациях органических компонентов в отбросных газах порядка 10 г/м^3 может возрасти на 15-20% по сравнению с теплотой сгорания природного газа. При условии применения прямой схемы обработки и подачи выбросов в топку котлов или технологических печей это может дать соответствующую экономию топлива.

Проведены экспериментальные исследования сжигания топлива с повышенными коэффициентами избытка выбросов в пределах $\alpha = 1,12...3,78$. Исследования показали, что при $\alpha = 1,12...1,50$ время пребывания в высокотемпературной зоне факела более чем на порядок превышает время, необходимое для полного выгорания метана. Такие режимы могут иметь место при обезвреживании отбросных газов в топках котлов, следовательно, при этом можно ожидать завершения выгорания загрязнителей непосредственно в зоне горения. При $1,5 < \alpha < 2,5$ выгорание отбросных компонентов будет завершаться на выходе из топки при достаточном

времени пребывания (т.е. при правильном выборе габаритных размеров топки, см. методику расчета в разд. 2.5.4). При $\alpha > 3$ трудно ожидать завершения выгорания загрязнителей в пределах топки. Результаты исследований позволили также подтвердить основные положения теоретических исследований по механизму стабилизации и выделить в структуре закрученного факела данной горелки высокотемпературную зону с близким к стехиометрическому содержанием газа и выбросов в корне факела, зону рециркуляции раскаленных продуктов горения в центральной части факела, а также наиболее низкотемпературную зону и зону догорания по периферии и в хвостовой части факела ([316]).

Выполнены экспериментальные исследования обезвреживания отбросных газов в производственных условиях при их отдельном и совместном с топливом вводе в топку. Результаты исследований показали следующее. При отдельном вводе температура в области смешения отбросных газов с продуктами горения находится в пределах 350—700° С. В таких условиях прослеживается зависимость концентраций токсичных компонентов на выходе из топки от их начальных концентраций и температуры в области смешения. При этом степень выгорания четко коррелирует с температурой, что позволило представить экспериментальные данные в виде линейной зависимости:

$$\psi = bt - c, \quad (5.12)$$

где ψ - степень выгорания, определяемая по начальным C_b , мг/м³ и конечным C_e , мг/м³ концентрациям загрязнителей; b , c - эмпирические константы, соответственно равные для акролеина 0,244 и 29, фенола 0,133 и 36, фталевого ангидрида 0,407 и 196; t - температура в области смешения выбросов и дымовых газов, °С;

При совместном вводе конечные концентрации токсичных компонентов зависят от температуры и времени пребывания и не зависят от начальных концентраций. Более эффективное, чем при отдельном вводе, выгорание отбросных компонентов объясняется более высоким температурным уровнем процесса при одинаковом с отдельным вводом расходе топлива и большим временем пребывания в зоне высоких температур. Кроме этого, значительно улучшается качество смешения.

В результате экспериментальных исследований получены эмпирические зависимости окисления загрязнителей от температуры факела t , °С, и времени пребывания τ , с:

$$C_e = at + b\tau + c \text{ мг/м}^3 \quad (5.13)$$

где C_e - конечная концентрация загрязнителя, акролеина и фенола, приведенная к объему продуктов горения с $\alpha = 1$; a , b , c - эмпирические константы, соответственно равные для акролеина (-0,0065; -0,276; 6,90) и для фенола (-0,0172; -0,71; 17,93).

Сжигание токсичных компонентов при совместном вводе отбросных газов и топлива является более экономичным, чем при раздельном вводе. Опыт внедрения и эксплуатации системы термообработки выбросов при совместном с топливом вводе в топку, показал существенное снижение затрат на топливо по сравнению с существовавшим до этого раздельным вводом в печь на термообработку выбросов и топлива. При этом величина экономического эффекта за счет энергосбережения (приложение П6) в пересчете на цены 2009 г. (80у.д.е. за 1000м³ природного газа) составила $(99000/24) \cdot 80 \cdot 31 = 10230000$ руб.

Произведен расчет экономической эффективности за счет снижения валового выброса загрязнителей после термообработки технологических отбросных газов объемом от 0,05 до 0,35 м³/с, содержащих акролеин (15...30 мг/м³), фенол (до 30 мг/м³), формальдегид (следы), фталевый ангидрид (5 мг/м³). Число часов работы производственных мощностей в году 7320 (таблица 5.6).

Таблица 5.6.

Экономия вследствие снижения платы за выбросы акролеина, фенола, формальдегида, фталевого ангидрида при загрузке производственных мощностей 7320 часов в год

Вещество	Формула	Концентрации до/ после обработки, 10 ⁻⁹ т/м ³	Интенсивность обрабатываемого технологического выброса м ³ /с	Валовой выброс загрязнителя до/после обработки т/год
3.Акролеин	CH ₂ CHCHO	30/0	0,139	0,11/0
187.Фенол	C ₆ H ₅ OH	30/0	0,139	0,11/0
15.Ангидрид фталевый	C ₆ H ₄ (CO) ₂ O	5/0	0,056	0,007/0
3.Акролеин	CH ₂ CHCHO	15/0	0,347	0,137/0

Таблица 5.6, продолжение

Снижение валового выброса загрязнителя т/год	Базовый норматив платы в пределах установленных лимитов, руб/т	Коэффициент экологической ситуации и экологической значимости	Коэффициент индексации платы за загрязнение на 01.01.2001	Плата в пределах установленных лимитов, по тарифам на 01.01.2001 руб/т	Экономия предприятием вследствие снижения платы за выбросы, руб/год
0,11	2750	1,9	94	491150	54026
0,11	27500	1,9	94	4911500	540260
0,007	825	1,9	94	147345	1031
0,137	2750	1,9	94	491150	67287
Итого экономия за счет снижения загрязнения выброса					662600

С пересчетом по ценам 2009 г. (коэффициент индексации 4,6) экономия для предприятия вследствие снижения платы за выбросы составит 3,05 млн руб., и с учетом энергосбережения – 13,28 млн руб.

В развитие исследованного метода разработаны предложения по внедрению высокоэффективного горелочного устройства (по рис. 5.4 б) для стадии дожига ступенчатого и ярусного горения с целью сокращения выброса НМЛОС, СО и оксидов азота при работе котлоагрегатов и ГТУ на объектах ОАО «Генерирующая компания». Пояснительная записка по расчету и акт внедрения представлены в приложении П8.

5.2 Методика расчета комплексных энергоэкологических показателей источников выбросов теплоэнергетики и экологических рисков при наличии парниковых газов. Общие положения

Выброс загрязнителя любого типа (токсичного вещества, парникового газа, теплового загрязнения) всегда сопровождается ущербом в виде потери качества атмосферного воздуха, восстановление которого требует энергетических и материальных ресурсов, и в итоге – дополнительных финансовых затрат. Поэтому в состоянии воздушной среды городов с развитой промышленностью качество газоочистных систем всегда играет заметную роль. С совершенствованием техники газоочистки в соответствии с развитием науки и техники непосредственно связано и совершенствование нормативов предельно допустимых вредных воздействий выбросов на окружающую среду и человека ([317]) в сторону улучшения качества жизни. Для совершенствования очистных систем, правильности выбора и улучшения условий эксплуатации необходимы простые показатели общего характера, дающие комплексную оценку санитарно-гигиенической, экологической и энергетической эффективности по всем загрязнителям. Разработка комплексного показателя эффективности газоочистных систем и нахождения уточненных характеристик, необходимых для его практического применения, в данной работе базируется на результатах численного исследования процесса рассеивания выбросов в атмосфере на базе коммерческих пакетов программ, реализующих методы CFD (Computational Fluid Dynamics).

В предлагаемой методике [318] за аналоги при разработке комплексного показателя санитарно-гигиенического, экологического и технического совершенства газоочистной системы показателя санитарно-гигиенической оценки систем очистки выбросов от загрязнения были приняты показатель санитарной эффективности «СЭ» по Г.П. Беспмятнову и Ю.А. Кротову, а также энергоэкологический показатель по А.Л. Шкаровскому.

В комплексном показателе санитарно-гигиенического, экологического и технического совершенства газоочистной системы:

$$\eta_{HE} = (1 - C_e/C_b) T_1 = (1 - C_e/C_b) T_2 \cdot ПДК/C_e. \quad (5.14)$$

$T_2 = \tau_2/\tau_0$ – безразмерное время заполнения выбросом контрольного объема V .

При практическом применении показателя η_{HE} необходимо знать величину ΔH , для определения которой точных теоретических или эмпирических соотношений не установлено. С целью получения уточненного соотношения для нахождения ΔH проведены численные исследования процесса рассеивания гомогенных загрязнителей методами вычислительной гидродинамики (пакет коммерческих программ *CFD “Fluent”*). Проведена проверка воспроизводимости вычислений и определены отклонения от данных, полученных в результате исследований, итоговой зависимости функции отклика, с учетом значимости коэффициентов регрессии составлено выражение (3.83). При значениях температуры воздуха и выброса, отличающихся от эталонных, при которых были проведены численные исследования, используется выражение с поправкой на плотность потоков

$$\Delta H = D \left[w_0^r \left(1,239 - 0,147 u_m^r \right) - 0,514 \right] \frac{(\rho_0 - \rho_{ar})}{(\rho - \rho_{ar})}, \text{ м}, \quad (5.15)$$

где ρ , ρ_0 – плотность газовой смеси на выходе из трубы расчетная и эталонная, ρ_{ar} – плотность атмосферного воздуха.

Уточненное выражение для определения расчетного объема пространства V , м^3 , на чистоту воздуха в котором оказывает непосредственное влияние исследуемый выброс, имеет вид:

$$V = 100\pi H^2 \left\{ H + D \left[w_0^r \left(1,239 - 0,147 u_m^r \right) - 0,514 \right] \frac{(\rho_0 - \rho_{ar})}{(\rho - \rho_{ar})} \right\} \quad (5.16)$$

Механизмами гибкости по РКИК ООН предусматривается замена существующего оборудования на более совершенное с точки зрения выброса парниковых газов с компенсацией части финансовых затрат. В связи с этим разработан показатель такого совершенства, позволяющий объективно сопоставлять источники выброса парниковых газов по энергозатратам на восстановление потери качества атмосферы. Его необходимость вызывается также тем, что в оценках эффективности инвестиций и при анализе проектных рисков затраты и доходы, связанные с практической реализацией положений *UN FCCC*, у нас пока во внимание принимаются недостаточно. Между тем нельзя сбрасывать со счетов и текущую внешнюю

ситуацию в этом направлении: программа по сокращению выброса парниковых газов в странах ЕС, несмотря на финансовый кризис, не была свернута, а в США при Б. Обаме ее интенсивно «разворачивают».

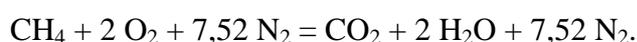
Приближение нормативов выбросов к евростандартам может привести к ограничениям производства или к дополнительным инвестициям и повлиять на эффективность и конкурентоспособность предприятий-владельцев мелких, средних и крупных топливоиспользующих систем, включая установки термообезвреживания, источники теплоснабжения, технологическое оборудование. В данный период такое дополнение общего неустойчивого состояния экономики может привести к серьезным финансовым потерям в промышленности.

Централизованные теплоисточники относятся к крупнейшим источникам выброса парниковых газов. К примеру, один котлоагрегат ПТВМ-180 при номинальной производительности выбрасывает в сутки с дымовыми газами порядка 25 тыс. т CO_2 . При этом из-за потерь топливо сжигается в большем количестве, чем необходимо для нужд потребителей. В России до последнего времени около 70% тепловой энергии производилось централизованными, а остальное – децентрализованными источниками тепла, включая автономные и индивидуальные. Децентрализация источников теплоснабжения позволяет решать задачи, связанные с потерями тепла в сетях. Инвестирование в них ведет к снижению себестоимости продукции предприятий за счет экономии энергии, которая по сравнению с традиционными системами может достигать в ряде случаев 10...15% [319]. Однако децентрализованным системам отопления присущи другие недостатки, ведущие к увеличению выброса CO_2 . В целом КПД теплогенераторов индивидуального теплоснабжения ниже, чем котлоагрегатов ТЭЦ и централизованных котельных. Причина в завышенных потерях с уходящими газами, так как требование компактности конструкций не позволяет организовать развитую поверхность теплообмена. Это повышает и тепловое загрязнение атмосферы.

Метод оценки соответствия систем очистки представлен применительно к эквиваленту выброса парниковых газов по диоксиду углерода CO_2 . Предлагаемый показатель получен из сопоставления энергетических затрат на гипотетическое снижение концентрации CO_2 в выбросах и в эталонной газовой смеси до среднего фонового содержания в атмосфере. Анализ затрат энергии возможных способов удаления CO_2 показал, что за расчетный удобно принять конденсацию при атмосферном давлении. Эталонном для сравнения служат продукты сгорания газового топлива (метана), т.к. их характеристики хорошо известны. Это обеспечивает однозначность определения теплоотвода от исследуемого выброса и сравниваемого объекта, и оценки источника выбросов в целом. Использование продуктов сгорания газа в качестве

объекта сравнения диктуется и тем, что производство энергии на настоящее время основано преимущественно на сжигании топлива.

Количество сжигаемого метана принимается эквивалентным тепловой энергии, отводимой при гипотетическом снижении концентрации CO_2 в исследуемых выбросах. Оценочные показатели представляются в виде показателя энергоэкологичности $EER = 1 - E_a^{dn} / E_{fg}^{dn}$, где E_a^{dn} , E_{fg}^{dn} – энергозатраты на теплоотвод при конденсации CO_2 из выбросов и эталонных продуктов сгорания. Объем последних определяется из необходимости сжигания метана для выработки энергии, эквивалентной E_a^{dn} . Эталонные газы – идеальные продукты полного сгорания метана



Расход метана, эквивалентный E_a по теплоте сгорания: $W_f = E_a / (\eta Q_l) m^3/c$, где Q_l – низшая теплота сгорания топлива, кДж/м³; η – коэффициент использования энергии топлива.

Комплексный показатель

$$\eta_{COMP} = \frac{EER \cdot V \cdot ПДК_{mp}}{C_e W \tau_0} \left(1 - \frac{C_e}{C_b}\right) = \left(1 - \frac{E_{aH_2O}^{dn} + E_{aCO_2}^{dn}}{1,10 E_a}\right) \left(\frac{1}{C_e} - \frac{1}{C_b}\right) \frac{ПДК_{mp}}{W \tau_0} \times \quad (5.17)$$

$$\times 100 \pi H^2 \left\{ H + D \left[w_0^r (1,239 - 0,147 u_m^r) - 0,514 \right] (\rho_0 - \rho_{ar}) / (\rho - \rho_{ar}) \right\},$$

где w_0^r , u_m^r – безразмерные скорости истечения дымовых газов и ветра; D_0 – диаметр устья трубы, м; ρ_0 , ρ – плотность дымовых газов при температуре, принятой в численных исследованиях $T_0 = 423$ К ($\rho_0 = 0,845$ кг/м³) и при расчетной температуре T ; ρ_{ar} – плотность воздуха в расчетных условиях при температуре атмосферного воздуха T_{ar} , К.

Расчеты, проведенные для вентиляционных выбросов ряда технологических процессов с различным содержанием CO_2 , показали достаточную чувствительность и универсальность показателя η_{COMP} , а также возможность его использования для оценки совершенства производственного оборудования как источника выброса парниковых газов.

Показатель η_{COMP} адаптирован также для объектов, являющихся источниками нескольких парниковых газов. Для упрощения принято, что улавливание ПГ не производится, ввиду чего часть выражения (5.17), определяющая эффект очистки η , а именно $(1 - C_e/C_b)$, опущена.

Соотношение $V \cdot ПДК / (C_e W \tau_0)$ преобразовано для случая поступления от источника выброса в атмосферу n парниковых газов. Вместо конечной концентрации загрязнителя C_e в

нем задействованы предельно допустимые по углеродным квотам концентрации C_{iAAU} , мг/м³, выбрасываемых парниковых газов, приведенные с помощью потенциалов глобального потепления GWP_{i100} к эквивалентному выбросу CO₂, мг CO₂-экв/м³. Величина M_{AAU} , т CO₂-экв/год, определена как допустимый массовый выброс парниковых газов, равный по величине углеродной квоте вида AAU (Assigned Amount Unit, единица установленного количества ЕУК).

Соответствующий ему секундный выброс всех парниковых газов $W \sum_{i=1}^n C_{iAAU} \cdot GWP_{i100}$,

мг CO₂-экв/с, можно численно приравнять к $10^{1.5} M_{AAU}$. Углеродное квотирование направлено на неперевышение существующей фоновой концентрации (background concentration BC) парниковых газов. Поэтому для характеристики изменения качества атмосферы из-за выброса загрязнителя, за концентрационный масштаб вместо ПДК мг/м³, которые для большинства ПГ не установлены из-за отсутствия токсичного воздействия на организм человека при непосредственном контакте, в преобразуемом соотношении использована сумма фоновых концентраций выбрасываемых газов BC_i , которая в пересчете на мг CO₂-экв имеет вид

$\sum_{i=1}^n BC_i \cdot GWP_{i100}$. Тогда для времени τ_1 , с, заполнения парниковыми газами контрольного

объема экспертной оценки V до их фоновых концентраций (в пересчете на мг CO₂-экв), при интенсивности выброса ПГ, отвечающей величине углеродной квоты вида AAU, равной

$W \sum_{i=1}^n C_{iAAU} \cdot GWP_{i100}$ (характеристика, аналогичная ПДВ), получим:

$$\tau_1 = \frac{V \sum_{i=1}^n BC_i \cdot GWP_{i100}}{W \sum_{i=1}^n C_{iAAU} \cdot GWP_{i100}}, \quad (5.18)$$

где V определяется, как и в случае отсутствия загрязнителей глобального действия.

Соотнеся τ_1 с соответствующим конкретной ситуации временным масштабом τ_0 , получим безразмерный временной параметр T_1 :

$$T_1 = \frac{\tau_1}{\tau_0} = \frac{V \sum_{i=1}^n BC_i \cdot GWP_{i100}}{\tau_0 \cdot W \sum_{i=1}^n C_{iAAU} \cdot GWP_{i100}}. \quad (5.19)$$

Временной масштаб может приниматься, как и для случая выброса только токсичных компонентов (без парниковых газов), равным периоду осреднения концентраций загрязнителей

$\tau_0 = 1200$ с. В частности же, при наличии в выбросах только парниковых газов, τ_0 если может быть найдено по установленному количеству углеродной квоты M_{AAU} , т CO_2 -эquiv /год как

$$\tau_0 = V \sum_{i=1}^n BC_i \cdot GWP_{i100} / (10^{1.5} M_{AAU}). \quad (5.20)$$

Тогда выражение $V \sum_{i=1}^n BC_i \cdot GWP_{i100}$ при масштабировании по τ_0 становится равным единице,

и

$$T_1 = \frac{10^{1.5} M_{AAU}}{W \sum_{i=1}^n C_i \cdot GWP_{i100}}. \quad (5.21)$$

В (5.21) отсутствуют величины контрольного объема, фоновой концентрации. Комплекс T_1 в таком виде удобен для сравнения интенсивности актуального и максимально допустимого

выбросов $W \sum_{i=1}^n C_i \cdot GWP_{i100}$, $W \sum_{i=1}^n C_{iAAU} \cdot GWP_{i100}$ ([320]). Условие $T_1 < 1$ будет означать превышение допустимой по углеродному квотированию величины выброса.

Касательно энергоэкологической составляющей EER в показателе η_{COMP} отметим, что установление параметра T_1 представленным выше способом позволяет оставить EER без изменения, т.к. все парниковые компоненты выбросов можно учесть с достаточной для практических расчетов точностью суммой их CO_2 -эквивалентов. Для источника нескольких парниковых газов:

$$\begin{aligned} \eta_{COMP} = EER \cdot T_1 &= \frac{\left(EER \sum_{i=1}^n BC_i \cdot GWP_{i100} \right) V}{\tau_0 \cdot W \sum_{i=1}^n C_{iAAU} \cdot GWP_{i100}} = \\ &= \left[1 - \frac{\eta Q_l (E_{aH_2O}^{dn} + E_{aCO_2}^{dn})}{39057,4 E_a} \right] \frac{\sum_{i=1}^n BC_i \cdot GWP_{i100}}{\tau_0 \cdot W \sum_{i=1}^n C_{iAAU} \cdot GWP_{i100}} \times \\ &\times 100 \pi H^2 \left\{ H + D \left[w_0^r (1,239 - 0,147 u_m^r) - 0,514 \right] \frac{(\rho_0 - \rho_{ar})}{(\rho - \rho_{ar})} \right\}. \end{aligned} \quad (5.22)$$

Если в выбросах вместе с n ингредиентами – парниковыми газами, присутствует еще m токсичных ингредиентов, то необходимо вернуть опущенные при выводе выражения (5.22) характеристики токсичности – предельно допустимые ПДК _{j} , начальные C_{jb} и конечные C_{je} концентрации:

$$\eta_{COMP} = \frac{EER \cdot V \left(\sum_{j=1}^m \text{ПДК}_j + \sum_{i=1}^n BC_i \cdot GWP_{i100} \right)}{\tau_0 \cdot W \left(\sum_{j=1}^m C_{je} + \sum_{i=1}^n C_{iAAU} \cdot GWP_{i100} \right)} \cdot \sum_{j=1}^m \left(1 - \frac{C_{je}}{C_{jb}} \right). \quad (5.23)$$

В общем случае (выражение 5.23) для обеспечения однозначности сравнения следует принимать временной масштаб равным периоду осреднения концентраций загрязнителей в атмосфере $\tau_0 = 1200$ с. Очевидно, что агрегат (устройство) тем совершеннее с энергетической, санитарно-гигиенической и экологической позиций, чем выше величина комплексного показателя η_{COMP} . По своей физической сути он представляет собой масштабированное по периоду осреднения концентраций (безразмерное) время заполнения контрольного объема атмосферы загрязнителями от источника выброса, скорректированное с учетом рейтинга его энергоэффективности по затратам на удаление парниковых газов (в пересчете на CO₂-экв.) и совершенства очистного устройства.

Выражения (5.22, 5.23) достаточно громоздки, однако все входящие в них величины однозначно определимы, ввиду чего получаемый результат в виде численного значения показателя η_{COMP} позволяет проводить объективное сравнение устройств и агрегатов, работа которых связана с выбросом токсичных и парниковых газов. На сегодня также имеет место теоретический, и в перспективе – практический интерес, использовать безразмерный комплекс η_{COMP} в качестве не только рейтингового показателя, но и критической величины. Такой показатель T_{cr} можно получить из выражения (5.23), приняв в нем за временной масштаб вместо τ_0 периоды жизни i -ого и j -ого загрязнителей t_{li} :

$$T = \frac{V \left(\sum_{j=1}^m \frac{\text{ПДК}_j}{t_{jlf}} + \sum_{i=1}^n \frac{BC_i \cdot GWP_{i100}}{t_{if}} \right)}{W \left(\sum_{j=1}^m C_{je} + \sum_{i=1}^n C_{iAAU} \cdot GWP_{i100} \right)}. \quad (5.24)$$

Тогда критической величиной данного показателя может служить значение $T_{cr} = 1$, при котором время заполнения контрольного объема исследуемым загрязнителем до предельной концентрации будет равно его времени жизни в атмосфере. Следовательно, при $T_{cr} < 1$ будет возможно накопление загрязнителя сверх допустимого норматива. Однако на данном этапе

сведения о трансформациях загрязнителей в атмосфере недостаточно однозначны, и поэтому показатель T_{cr} пока может быть использован только для выполнения предварительных оценок.

Безразмерный комплекс $\eta_{СОМР}$ по выражениям (5.22, 5.23) вследствие однозначности удобен для использоваться в подготовке проектов МЧР и ПСО. В оценке их эффекта и при установлении объективного сценария базовой линии выбросов возникает ряд дополнительных затруднений. Так, на изготовление материалов, из которых сооружается очистная система, расходуется энергия, а ее получение сопровождается выбросами ПГ. Вычисление таких косвенных эмиссий от реализации проекта принципиально возможно, но трудоемко. Эти трудности и неопределенности в сочетании с процедурой гарантий дополнительности могут вызвать добавочные затраты и риски на пути инвесторов к МЧР или ПСО. К примеру, результаты оценок риска для инвестора ПСО (по [321]) могут следующим образом повлиять на решение иностранной компании-инвестора о вложении капитала по проекту совместного осуществления в повышение эффективности российской угольной электростанции посредством уменьшения выбросов парниковых газов. При торговле выбросами, инвестирование в проекты уменьшения выбросов при получении положительного результата и с ним – единиц сокращения выбросов (ЕСВ), могло бы стать для инвестора одним из способов оплаты за квоты – единицы установленного количества выбросов (ЕУК) в своей стране. По исходной информации инвестора, вероятность того, что ожидаемая стоимость ЕУК по завершении проекта будет на уровне 10 условных денежных единиц за тонну CO_2 -эквивалента (у.д.е./т CO_2 -экв), составляет 0,9, с 10%-ным риском на нижнем пределе 7 у.д.е./т CO_2 -экв. С учетом этого риска, инвестиции в проект могут принести выгоду, при условии, что капиталовложения K по стоимости будут ниже ЕСВ:

$$K < ЕСВ = 10 - 0,1 \cdot 7 = 9,3 \text{ у.д.е./т } CO_2\text{-экв.}$$

Инвестор также боится на то, что сертифицировать ЕСВ по разным причинам удастся только наполовину, считая вероятность такого события 50%. С учетом этого риска инвестиции не должны превосходить

$$K < 9,3 (1 - 0,5 \cdot 0,5) = 6,98 \text{ у.д.е./т } CO_2\text{-экв.}$$

Инвестор также полагает, что с 10%-ной вероятностью угольная электростанция за время до реализации проекта может обанкротиться, и инвестиции не принесут ЕСВ. Принимая этот риск во внимание, инвестиции должны быть ниже:

$$K < 6,98 (1 - 0,1) = 6,28 \text{ у.д.е./т CO}_2\text{-экв.}$$

Таким образом, расчетная цена ЕСВ, которая могла бы быть получена от данного проекта CO, покрывает только 62,8% стоимости покупки такого же количества ЕУК. По-другому, чтобы быть не убыльным, проект должен принести не менее $(100/62,8) = 160\%$ возврата средств. При этом в примере учтены лишь риски, возникающие по ходу реализации проекта CO. Если это дополняется значительными «организационными» и прочими рисками, затягивающими реализацию проекта, то подобающего инвестора не удовлетворит никакой уровень возврата средств: основной критерий – ограниченность во времени, а в мире существует большой выбор возможностей.

Исследования производства и рынков сбыта топливоиспользующего оборудования, которое является одним из основных источников CO₂, проводившиеся в европейских странах в конце 90-х годов прошлого века, выявили также ряд технических проблем, напрямую связанных, наряду с влиянием на изменение климата, и с финансовыми вопросами. В частности, не определен экономически оптимальный диапазон климатических зон и тепловых нагрузок различных видов оборудования. В зарубежной технической литературе (см., напр. Air Cond. Heat and Refrig. News, 1996, 199, №12, p.11; 1997, 200, № 4, p. 100-104; Gaz aujourd'hui, 1997, 121, № 5, p. 378-381; № 7, p. 437-440; JKZ - Haustechn., 1997, 52, № 20, s. 86) отмечается отсутствие способов выявления преимуществ для обоснованного отбора по теплотехническим и эксплуатационным параметрам. Наряду с техническим сопоставлением объектов в кризисный период для собственника еще более возрастает значимость обоснованной оценки экономического риска. Отсутствие необходимых для этого инструментов затрудняет правильный выбор оборудования для нового строительства, замены или модернизации старых систем.

В условиях, когда быстро меняются цены на топливо и оборудование, постоянно обновляются его виды, а также при общей неустойчивости мировой и локальных финансовых систем, становится особо важной возможность оперативной технико-экономической оценки вариантов. Соответствующие показатели, кроме объективной оценки экономической эффективности, должны отражать теплотехническое совершенство оборудования и ориентировочную степень риска капиталовложений. Служившие ранее основой сравнения вариантов нормативные коэффициенты эффективности капиталовложений и сроки окупаемости потеряли значимость, а вследствие нестабильности ценовой и технической политики у нас были мало пригодны зарубежные методы оценки затрат и границ риска. В последнее время эти методы теряют свою объективность и в странах ЕС. В работе [322] показано, что эффективное

управление политическими рисками возможно только посредством централизованного контроля на национальном и международном уровне.

К типичными политическим факторам, влияющим на риски в сфере теплоснабжения, относят колебания цены на нефть, международные экологические договоры, в том числе по *UN FCCC*, энергетическую политику, налогообложение, дотации и нормирование (экологическое, промышленной безопасности и др.) на уровне ЕС и государств. Формы налогообложения могут влиять на эффективность и конкурентоспособность теплоснабжения вплоть до уровня выбора типа энергоносителя, например, на конкуренцию топливо/электричество. Предвидение оценки изменений в налогообложении и стабильность дотаций занимает ключевую позицию при выборе вида топлива и принятии решений об инвестициях. Мотивами же налогообложения могут быть помимо чисто фискальной деятельности экологические нюансы (нацеленные на безотходность производства), фактор протекционизма и множество других. Поэтому для стран ЕС так же, как и для России, до достижения состояния устойчивого развития, которое по объективным прогнозам может наступить не ранее чем через 3-5 лет, продолжает иметь значение субъективный фактор косвенного влияния на теплоснабжение действий официальных органов различных уровней. С этим снижается значимость всеобъемлющих методик расчетов конкурентоспособности и рисков.

Для обеспечения в существующих условиях оперативности, доступности и достаточной объективности, методика оценки рисков ориентируется на небольшое число факторов. Они должны относиться к характерным и определяющим факторам для данной сферы деятельности, а также объективно ассимилировать риски по смежным направлениям.

Так например, если проектируемая система имеет очень высокую устойчивость по рискам от будущих финансовых затруднений, связанных с выбросом парниковых газов, то для данного объекта эти риски могут не приниматься во внимание. В то же время необходим анализ позиций устойчивости по фактору энергосбережения. Для источников выброса парникового газа CO_2 , относящихся к сфере теплоснабжения – сектору экономической деятельности с высокой ликвидностью, наиболее характерным фактором риска за короткий период представляется нестабильность цен на топливо.

Предлагаемая методика [102] позволяет проводить экспресс-оценку рисков инвестиций в теплоисточники как централизованного, так и децентрализованного теплоснабжения на основе современных теплогенераторов различной мощности. За условные денежные единицы (у.д.е.) принимаются наиболее стабильные из прогнозируемых на расчетный период, как правило – рубль или/и бивалютный эквивалент. Приведенные затраты рассчитываются по одногодичному (нормативному) сроку эксплуатации t , что позволяет в определенной степени объективно

учесть влияние нестабильности цен. Это дает нижнюю границу эффективности, и, следовательно, максимальную зону риска. В качестве параметров, определяющих область риска вложений и экономическую эффективность, используются отношения прогнозируемого стоимостного эквивалента S годового расхода топлива (энергонасителя) к приведенным затратам в целом и к доле приведенных затрат, не содержащей стоимости топлива. Обобщенным теплотехническим и экономическим показателем систем служит коэффициент использования топлива ι , который акцентированно влияет на ценовые показатели сравниваемых вариантов.

Стоимостный эквивалент S энергонасителя для сооружаемой системы определяется из выражения:

$$S = NmTC/\iota = s/\eta, \text{ у.д.е.}, \quad (5.25)$$

где N – мощность теплоисточника, кВт; m – нормативный срок эксплуатации, принятый равным 1 году; T – продолжительность отопительного периода, ч/год; C – прогнозируемая среднегодовая цена энергонасителя, у.д.е./кВт-ч; ι – коэффициент использования топлива (к.и.т.) рассчитываемой системы; s – стоимостный эквивалент расхода топлива, у.д.е., без учёта к.и.т.

Величина S является частью приведенных затрат P , у.д.е./год, и характеризует топливные затраты. Другие позиции, составляющие P – стоимость (без цены топлива) годового обслуживания системы и капитальные вложения, включающие стоимость оборудования, изыскательских, проектно-конструкторских, строительно-монтажных, пусконаладочных и др. работ, для простоты записи обозначим вкуче K , у.д.е. С учетом этого

$$P = S+K = (s/\eta) + K = (s+\eta K) / \eta, \text{ у.д.е.} \quad (5.26)$$

Коэффициенты использования топлива η_1 и η_2 сравниваемых вариантов заметно влияют на результаты расчётов и могут играть определяющую роль при выборе вариантов (см.: таблица 5.7). Поэтому параметр эффективности Π , рассчитываемый как отношение P_1, P_2 сравниваемых вариантов –

$$\Pi = P_1/P_2 = [(s_1+\eta_1 K_1)\eta_2]/[(s_2+\eta_2 K_2)\eta_1], \quad (5.27)$$

отражает и ценовую эффективность, и теплотехническое совершенство систем. При $\Pi = 1$ системы равнозначны, при $\Pi < 1$ экономичнее первая, при $\Pi > 1$ – вторая. Вместе с тем параметр Π еще не отражает влияния нестабильности топливно-ценовой ситуации на степень риска вложения средств в систему теплоснабжения и может дать ложное представление о возможности получения прибыли по одному из вариантов в сравнении с другим. Поэтому далее рассматривается параметр пределов риска

$$L = \eta K/S. \quad (5.28)$$

Он характеризует количество у.д.е. вложений (без учёта топливных), которые предстоят собственнику для сооружения и годичной эксплуатации системы отопления, на одну у.д.е. топливных затрат в год, ожидающих его в ближайшем будущем, поддающемся объективному прогнозированию. С уменьшением L степень риска растёт. При $L > 1$ она незначительна, а при $L \ll 1$ вложение средств чрезвычайно рискованно. Ориентировочно за нижний предел зоны риска можно принять $L = 1$.

Если значения Π , L рассматриваемых вариантов различаются мало, то определяются уточнённые параметры риска сопоставляемых вариантов из-за предстоящих топливных платежей F :

$$\Delta F = (F_h/F_l - 1) 100\%, \quad (5.29)$$

где $F_{h(l)}$ – больший (меньший) по сравниваемым вариантам параметр риска из-за предстоящих платежей, определяемый как отношение предстоящих затрат на топливо S , у.д.е., к приведённым затратам P , у.д.е.:

$$F = S/P = (1 + \eta K/s)^{-1}. \quad (5.30)$$

Система с меньшим значением F , т.е. с меньшей величиной топливных платежей на одну у.д.е. общих затрат, для собственника системы будет менее рискованной. Значимость параметра F особо повышается в моменты, когда возникают сложности объективного прогнозирования топливных цен на длительный период. Следует иметь в виду, что методика выявляет область риска относительно того уровня капитала, который может быть вложен заказчиком, и не даёт абсолютных показателей.

Выполнен ряд расчетов по сравнению вариантов с близкими значениями приведенных затрат. В качестве примера в таблице: таблица 5.7 приведены результаты расчетов некоторых типичных случаев. Они достаточно чувствительны к изменению коэффициента использования топлива (поз. 2, 3, 4). При этом итоговые приоритеты ориентированы на минимум топливных затрат (поз. 3, 4). Используемые показатели области риска L , ΔF обеспечивают возможность однозначного выбора варианта при близких приведенных затратах (поз. 1, 2, 3). Для приблизительно равноценных по затратам и техническому совершенству вариантов оказываются примерно равными и показатели риска (поз. 4).

Таблица 5.7.

Расчет вариантов с близкими значениями приведенных затрат $P = K + S$

№ поз	№ вар	K, у.д.е	S, у.д.е	η	L	P, у.д.е	П	F	ΔF , %	Приоритетный вариант			
										по L	по П	по ΔF	Итог
1	1	600	1000	0,75	4,5	733	0,89	0,1818	21	1	1,	1	1
	2	350	3500	0,75	0,75	816	8	0,571	4	неявн			
2	1	600	1000	0,75	4,5	733	1,00	0,1818	37	1	2,	1	1
	2	100	6000	0,95	0,15	731	2	0,863	5	неявн			
3	1	600	1000	0,85	5,1	717	0,97	0,164	28	1	1,	1	1
	2	585	1150	0,75	3,82	738	2	0,21		неявн			
4	1	600	1000	0,75	4,5	733	1,02	0,1818	3	1,	2,	1,	1,
	2	585	1150	0,85	4,32	720		0,1878		неявн	неявн	неявн	неявн

Таким образом, методика позволяет сделать выбор теплоисточников и систем теплоснабжения с учетом энергоэкономичности, что в современной ситуации важно для инвесторов и собственников сооружаемых объектов.

Ориентированность методики на минимизацию топливных затрат как единственный реальный способ уменьшения выбросов CO_2 позволяет снизить риски и на случай изменения нормативов по парниковым газам в ближайшем будущем.

5.2.1 Выбор системы отопления на базе комплексных энергоэкологической показателей источника теплоснабжения с учетом выброса парниковых газов и экологических рисков инвестиций

Для отопления административно-производственного здания автоцентра ООО «ТатМАЗсервис» (г. Казань, ул. Гаврилова, 10а) сравниваются варианты децентрализованных

источников теплоснабжения на базе электрических и газовых котлов с общей теплопроизводительностью 0,313 МВт. Сравнение вызвано необходимостью представления заказчику обоснованных объективных показателей наличия или отсутствия рисков инвестирования объектов при вероятном ужесточении нормативов по выбросу парниковых газов в ближайшее время. Дополнительное значение для инвестора более полного учета рисков было продиктовано затруднениями из-за кризисного состояния в кредитной сфере.

Расчеты $\eta_{\text{СОМР}}$

Как известно, одним из основных преимуществ электрокотлов представляется практическое отсутствие атмосферных выбросов. Несмотря на то, что при использовании электрокотлов доля выброса CO_2 , почти эквивалентная потребляемой электроэнергии, никуда не исчезает, а только переносится на место ее производства, даже респектабельные рекламные сервисы удачно используют этот факт как преимущество (см., например, <http://services.google.com/feedback/abg?url> в *Google* – «Стоит отметить, что при установке в больших городах с жесткими экологическими нормами и проблемами согласования, электрокотлы часто выигрывают у всех остальных типов котлов (включая газовые)»). В любом случае, это снимает экологические риски с владельцев децентрализованных теплоисточников и повышает инвестиционную привлекательность установки электрокотлов.

В связи с вышесказанным возникает необходимость определения гарантированных и объективных показателей рисков инвестиций по выбросу парниковых газов. Поэтому далее в расчетах принимаем, что получаемая инвестором электроэнергия экологически чиста, и определяем параметр устойчивости по экологическим рискам для теплоисточников на газовом топливе. Принимаем тепловую мощность газоиспользующих объектов $Q=0,313$ МВт, $\alpha=1,15$, η (к.и.т.) $=0,87$. Высота источника выброса $H=14$ м, диаметр $D=0,25$ м, температура выброса $t=200^\circ\text{C}$ (плотность дымовых газов $\rho=0,75$ кг/м³), ρ скорость выброса $w_0^r=3,3$ м/с, скорость ветра $u_m^r=2$ м/с, температура воздуха 0°C , максимальная приземная концентрация загрязнителя (по NO_x) наблюдается на расстоянии $X=383,5$ м от источника.

1. Определение показателя энергоэкологичности EER удобно проводить по расходу газа W_f . Исследуемый выброс, как и эталонный, является продуктом сгорания газового топлива. Поэтому $E_{a\text{H}_2\text{O}}^{dn} + E_{a\text{CO}_2}^{dn} = E_{fg\text{H}_2\text{O}}^{dn} + E_{fg\text{CO}_2}^{dn}$, и

$$EEE = 1 - \frac{E_{a\text{H}_2\text{O}}^{dn} + E_{a\text{CO}_2}^{dn}}{39057,4W_f} = 1 - \frac{3868,5W_f + 1162,7W_f}{39057,4W_f} = 0,871$$

2. Определение показателя санитарно-гигиенического и экологического совершенства очистки

 η_{HE}

Определяем интенсивность выброса как продуктов сгорания природного газа с низшей теплотой сгорания 35,5 МВт: $W = 10,52\alpha Q / \eta Q_t = 0,1226 \text{ м}^3/\text{с}$.

Из-за невысокой мощности теплоисточника риски вследствие ужесточения нормативов по NO_x не учитываются, и

$$\eta_{HE} = \frac{V}{W\tau_0} = \pi X^2 \left\{ H + D \left[w_0^r (1,239 - 0,147 u_m^r) - 0,514 \right] \frac{(\rho_0 - \rho_{ar})}{(\rho - \rho_{ar})} \right\} / (4W\tau_0);$$

$$\eta_{HE} = \frac{3,14 \cdot 683,5^2 \left\{ 14 + 0,25 \left[3,3(1,239 - 0,147 \cdot 2) - 0,514 \right] \frac{(0,845 - 1,293)}{(0,75 - 1,293)} \right\}}{4 \cdot 0,1226 \cdot 1800} = 7609$$

3. Определение комплексного показателя η_{COMP}

$$\eta_{\text{COMP}} = EEE \cdot \eta_{HE} = 0,871 \cdot 7609 = 6627$$

Полученные значения η_{HE} и η_{COMP} показывают высокую устойчивость объекта по рискам, связанным с санитарно-гигиеническими и экологическими проблемами. Так например, значение η_{HE} соответствует заполнению выбросом контрольного объема приблизительно в течении 5 месяцев, что значительно превосходит срок, необходимый для трансформации в атмосфере обычных (не радионуклидных) загрязнителей. Для сорбции в окружающей среде выбросов сжигания газообразного топлива гарантированно достаточно 10 – 14 дней, что соответствует значению η_{HE} порядка 500-700.

В то же время энергетическая компонента затрат, выражаемая показателем EEE , отличается от идеальной (близкой к 1). Поэтому необходим дальнейший анализ рисков инвестиций и сравнение объектов на газовом и электрическом энергоносителях по аспекту топливно-энергетических затрат.

Расчеты рисков по топливно-энергетическим затратам

Стоимость S_1 энергоносителя – газового топлива при тарифе 80 у.д.е. /1000м³:

$$S_1 = N_1 mTC / \eta_1 = (0,3138 \cdot 3600 / 35,5) \cdot 1 \cdot 5000 \cdot 80 \cdot 10^{-3} / 0,87 = 14631 \text{ у.д.е.}$$

Стоимость (без затрат на газовое топливо) годового обслуживания системы на газовом топливе (6400 у.д.е.) и капитальные вложения, включающие стоимость оборудования (стоимость 8 котлов Beretta Exclusiwe MIX 30CSI 7200 у.д.е., 2 котлов Beretta Exclusiwe MIX 35CSI 1960 у.д.е., всего на котельное оборудование 9160 у.д.е.), проектно-конструкторских (9500 у.д.е.), строительно-монтажных, пусконаладочных и др. работ (12800 у.д.е.)

$$K_1 = 6400 + 9160 + 9500 + 12820 = 37880 \text{ у.д.е.}$$

С учетом этого

$$P_1 = S_1 + K_1 = 14631 + 37880 = 52511 \text{ у.д.е.}$$

Стоимость S_2 энергоносителя – электричества при тарифе 72,5\$/1000кВт-ч:

$$S_2 = N_2 mTC / \eta_2 = 313,8 \cdot 1 \cdot 5000 \cdot 72,5 \cdot 10^{-3} / 1 = 113752 \text{ у.д.е.}$$

Стоимость (без затрат на электроэнергию) годового обслуживания системы (4200 у.д.е.) и капитальные вложения, включающие стоимость оборудования (стоимость 8 электродвигателей мощностью по 30 кВт – 7750 у.д.е., 2 котлов по 35 кВт – 2260 у.д.е., всего на котельное оборудование 10010 у.д.е.), проектно-конструкторских (8500 у.д.е.), строительно-монтажных, пусконаладочных и др. работ (9200 у.д.е.)

$$K_2 = 4200 + 10010 + 8500 + 9200 = 31910 \text{ у.д.е.}$$

С учетом этого

$$P_2 = S_2 + K_2 = 113752 + 31910 = 145662 \text{ у.д.е.}$$

Параметр эффективности Π , отражающий ценовую привлекательность и теплотехническое совершенство систем:

$$\Pi = P_1 / P_2 = 52511 / 145662 = 0,360$$

Условие $\eta_2 > \eta_1$ здесь не дает преимуществ второму варианту, т.к. $\Pi \ll 1$, и первый вариант очевидно экономичнее вследствие дороговизны электричества как энергоносителя. Для оценки влияния нестабильности цены энергоносителей на степень риска вложения средств в систему теплоснабжения, переходим к параметру пределов риска

$$L_1 = \eta_1 K_1 / S_1 = 0,87 \cdot 37880 / 14631 = 2,07$$

$$L_2 = \eta_2 K_2 / S_2 = 1 \cdot 31910 / 113752 = 0,280$$

Значение L_1 вдвое выше нижнего предела зоны риска $L = 1$. По значению $L_2 \ll 1$ можно сделать однозначный вывод о рискованности инвестиций, имея при этом в виду, что предельный прогноз соответствует периоду ожидания резких скачков цен на энергоносители. Вместе с тем при уровне капитала, позволяющем без затруднений обеспечивать определенную выше оплату электроэнергии, в период стабильного изменения цен на рынке энергоносителей, инвестор может выбрать и 2-ой вариант. В настоящий момент, когда объективное прогнозирование цен энергоносителей на более или менее длительный период затруднено, можно уточнить риски сопоставляемых вариантов из-за предстоящих платежей за энергоносители по параметру F :

$$F_1 = S_1 / P_1 = 14631 / 52511 = 0,279$$

$$F_2 = S_2 / P_2 = 113752 / 145662 = 0,781.$$

Система отопления с газовыми котлами имеет меньшую величину платежей за энергоносители на одну у.д.е. общих затрат: $F_1 < F_2$, и будет менее рискованной для собственника системы. Оценочное значение превышения степени риска при использовании системы с электродкотлами

$$\Delta F = (F_2 / F_1 - 1) 100\% = 180\%.$$

Таким образом, для ООО «ТатМАЗсервис» на настоящее время степень риска вложения средств в систему отопления автоцентра при использовании электродкотлов в 2,8 раза выше, чем при использовании котлов на газовом топливе.

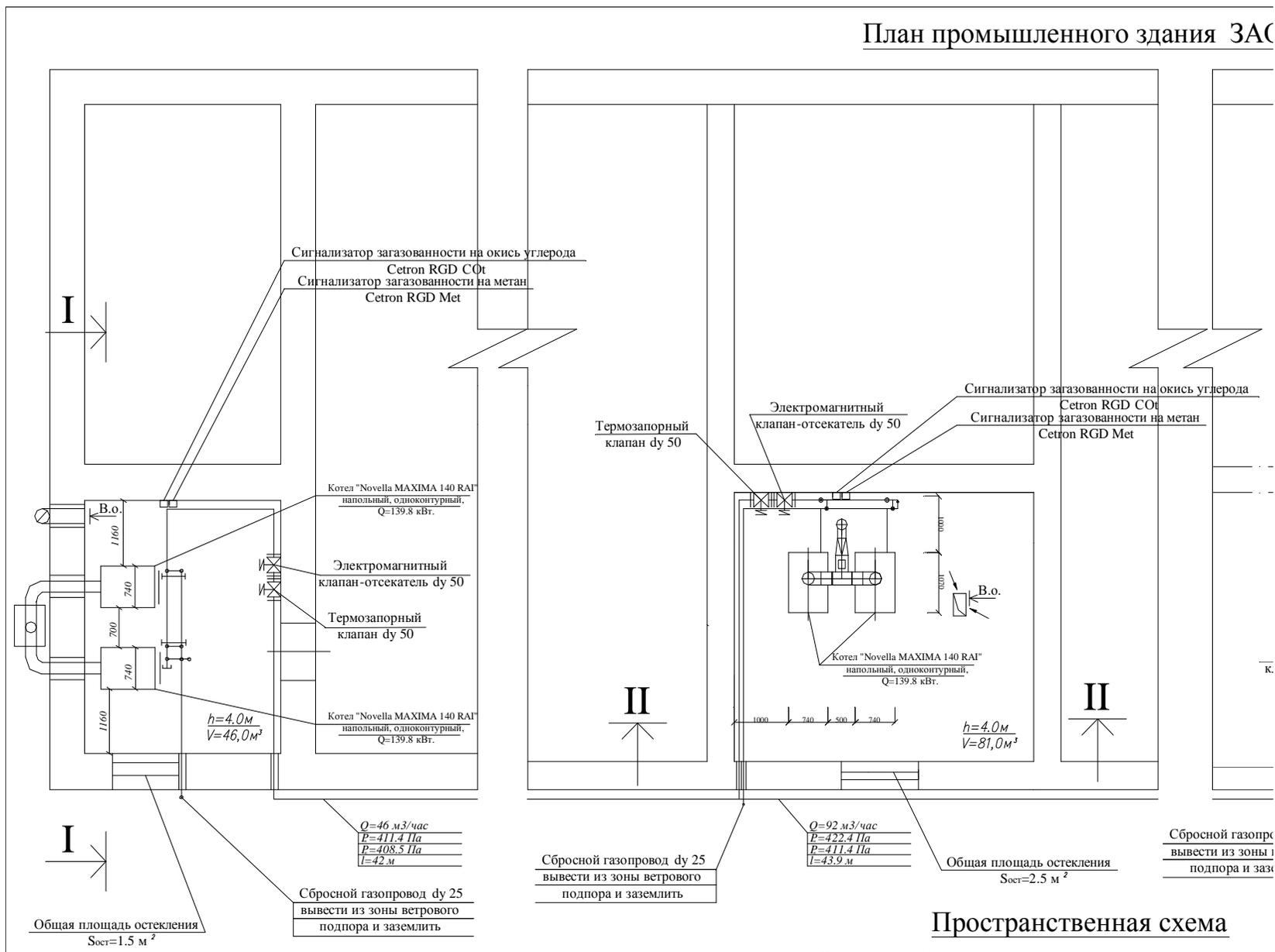
Сводим все параметры рисков в таблицу: таблица 5.8.

Таблица 5.8. Сводная таблица параметров рисков

№ ва р.	K , у.д.е.	S , у.д.е.	η	L	P , у.д.е.	Π	F	ΔF , %	Приоритетный			
									вариант			Итого
								по I	по II	по III		
1	37880	14631	0,87	2,0	46111	0,325	0,279	180	1	1	1	1
2	31910	11375	1	0,2	14146		0,781					

Сопоставление параметров позволяет считать приоритетным первый вариант с использованием 8 котлов Beretta Exclusiwe MIX 30CSI и 2 котлов Beretta Exclusiwe MIX 35CSI на газовом топливе.

Рис.5.5 Частичный план промышленного здания ЗАО «АКОС» АСТ Сервис с сушильной камерой и 2 встроенными котельными



Теплогенератор оборудован камерой сгорания; горелка оснащена автоматикой регулирования, обеспечивающей экономичное сжигание газа. Подобными генераторами могут комплектоваться системы подготовки твердого топлива ТЭС. Подача воздуха к горелке от вентилятора поддерживается в соответствии с заданным соотношением газа и воздуха, соответствующим оптимальному режиму горения. Автоматика безопасности контролирует давление газа, давление воздуха, наличие пламени горелки и герметичность клапана. При сгорании топлива тепло через стенки камеры сгорания передается воздуху, подаваемому в теплогенератор и омывающему стенки камеры сгорания. Отвод продуктов сгорания осуществляется через дымоход – металлическую трубу диаметром 250мм (входит в комплект поставки сушильной камеры), с выпуском на 2 м выше кровли здания.

В производственном помещении промышленного предприятия проектируются 2 встроенные котельные 0,84 МВт с 4 напольными одноконтурными чугунными котлами Veretta Novella MAXIMA 140 RAI. В качестве альтернативы возможна установка 4 электродвигателей ЭВАН класса Професионал ЭПО 144 мощностью 144 кВт.

Расчет $\eta_{\text{СОМР}}$ для источников выброса парниковых газов

Тепловая мощность газоиспользующих объектов – 2 котельных общей мощностью $Q_1=0,84$ МВт, теплогенератор $Q_2=0,28$ МВт. Коэффициенты избытка воздуха горелочных устройств котлов и теплогенератора приняты $\alpha=1,1$, η (к.и.т.) = 0,85, высота источников выброса $H=9,6$ м, диаметр $D=0,25$ м, температура выброса $t=200^\circ\text{C}$, скорость выброса $w=3$ м/с, скорость ветра 2 м/с, температура воздуха 0°C , максимальная приземная концентрация загрязнителя (по NO_x) наблюдается на расстоянии $X=280,2$ м от источника.

1. Определение показателя энергоэкологичности EER проводится по общему расходу газа $W_f = 120$ м³/ч. Исследуемый выброс, как и эталонный, является продуктом сгорания газового топлива. В этом случае $EEE = 0,871$.

2. Определение показателя санитарно-гигиенического и экологического совершенства очистки η_{HE} .

Токсичное воздействие выброса не рассматривается, и

$$\eta_{HE} = \frac{V}{W\tau_0} = \frac{\pi X^2 \left\{ H + D \left[w_0^r \left(1,239 - 0,147 u_m^r \right) - 0,514 \right] (\rho_0 - \rho_{ar}) / (\rho - \rho_{ar}) \right\}}{4W\tau_0}$$

Определяем интенсивность выброса как продуктов сгорания с общим расходом природного газа $W_f = 120 \text{ м}^3/\text{ч}$:

$$W_{fg} = 10,52\alpha W_f = 10,52 \cdot 1,1 \cdot 120 / 3600 = 0,3857 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$\eta_{HE} = \frac{3,14 \cdot 280,2^2 \left\{ 9,6 + 0,25 \left[3 (1,239 - 0,147 \cdot 2) - 0,514 \right] \frac{(0,845 - 1,293)}{(0,75 - 1,293)} \right\}}{4 \cdot 0,3857 \cdot 1800} = 895.$$

3. Определение комплексного показателя η_{COMP} .

$$\eta_{\text{COMP}} = EEE \cdot \eta_{HE} = 0,871 \cdot 895 = 780$$

Полученные значения η_{HE} и η_{COMP} показывают достаточную устойчивость объекта с двумя встроенными котельными и теплогенератором, работающими на природном газе, при общей теплопроизводительности 1,12 МВт, по рискам, связанным с санитарно-гигиеническими и экологическими проблемами.

Расчеты рисков по топливно-энергетическим затратам для встроенных котельных

Далее выполнен анализ рисков инвестиций и сравнение объектов на газовом и электрическом энергоносителях по аспекту топливно-энергетических затрат по отношению к встроенным котельным. Для теплогенератора окрасочно-сушильной камеры альтернативы перевода на другой энергоноситель заказчик не имеет, т.к. теплогенератор на газовом топливе входит в комплект окрасочно-сушильной камеры.

Стоимость одноконтурного чугунного котла Veretta Novella MAXIMA 140 RAI 153155 руб., электродкотла ЭВАН класса Професионал ЭПО 144 мощностью 144 кВт - 148010 руб.

Стоимость S_1 энергоносителя – газового топлива при тарифе 80 у.д.е. /1000м³:

$$S_1 = N_1 mTC / \eta_1 = (0,84 \cdot 3600 / 35,5) \cdot 1 \cdot 5000 \cdot 80 \cdot 10^{-3} / 0,87 = 39165 \text{ у.д.е.}$$

Стоимость (без затрат на газовое топливо) годового обслуживания системы на газовом топливе (7200 у.д.е.) и капитальные вложения, включающие стоимость оборудования

(стоимость 4 котлов Beretta Novella MAXIMA 140 RAI 19025 у.д.е.), проектно-конструкторских (14000 у.д.е.), строительного-монтажных, пусконаладочных и др. работ (16200 у.д.е.)

$$K_1 = 7200 + 19025 + 14000 + 16200 = 56425 \text{ у.д.е.}$$

С учетом этого

$$P_1 = S_1 + K_1 = 39165 + 56425 = 95590 \text{ у.д.е.}$$

Стоимость S_2 энергоносителя – электричества при тарифе 72,5\$/1000кВт-ч:

$$S_2 = N_2 mTC / \eta_2 = 840 \cdot 1 \cdot 5000 \cdot 72,5 \cdot 10^{-3} / 1 = 304500 \text{ у.д.е.}$$

Стоимость (без затрат на электричество) годового обслуживания системы (5600 у.д.е.) и капитальные вложения, включающие стоимость оборудования (стоимость 4 электродкотлов ЭВАН класса Профессионал ЭПО 144 мощностью 144 кВт 18386 у.д.е.), проектно-конструкторских (10500 у.д.е.), строительного-монтажных, пусконаладочных и др. работ (12200 у.д.е.)

$$K_2 = 5600 + 18386 + 10500 + 12200 = 46686 \text{ у.д.е.}$$

С учетом этого

$$P_2 = S_2 + K_2 = 304500 + 46686 = 351186 \text{ у.д.е.}$$

Параметр эффективности Π , отражающий ценовую привлекательность и теплотехническое совершенство систем:

$$\Pi = P_1 / P_2 = 95590 / 351186 = 0,272$$

Условие $\eta_2 > \eta_1$ не дает преимуществ второму варианту, т.к. вновь $\Pi \ll 1$, и первый вариант экономичнее вследствие дороговизны электричества как энергоносителя. Для оценки влияния нестабильности цены энергоносителей на степень риска вложения средств в систему теплоснабжения, переходим к параметру пределов риска

$$L_1 = \eta_1 K_1 / S_1 = 0,87 \cdot 56425 / 39165 = 1,25$$

$$L_2 = \eta_2 K_2 / S_2 = 1 \cdot 46686 / 304500 = 0,15$$

Значение L_1 для варианта с газовыми котлами находится на нижнем пределе зоны риска $L = 1$, а значение $L_2 \ll 1$ позволяет сделать однозначный вывод о рискованности инвестиций в вариант с электродкотлами. Для рассматриваемого случая имеет смысл уточнения рисков сопоставляемых вариантов из-за предстоящих платежей за энергоносители по параметру F :

$$F_1 = S_1/P_1 = 39165/95590 = 0,41,$$

$$F_2 = S_2/P_2 = 304500/351186 = 0,87.$$

Система отопления с газовыми котлами имеет меньшую величину платежей за энергоносители на одну у.д.е. общих затрат: $F_1 < F_2$, и будет менее рискованной для собственника системы. Оценочное значение превышения степени риска при использовании системы с электродкотлами

$$F = (F_2/F_1 - 1) 100\% = (0,87/0,41 - 1) 100\% = 112\%$$

Таким образом, для ЗАО «АКОС» АСТ Сервис на настоящее время степень риска вложения средств в систему отопления промздания при использовании электродкотлов в 2 раза выше, чем при использовании котлов на газовом топливе.

Сводим все параметры рисков в таблицу: таблица 5.9.

Таблица 5.9.

Сводная таблица параметров рисков

№ вар.	K, у.д.е.	S, у.д.е.	η	L	P, у.д.е.	П	F	ΔF , %	Приоритетный вариант			
									по L	по П	по ΔF	Итого -вый
1	56425	39165	0,87	1,2	95590	0,272	0,41	112	1, неявно	1	1	1
2	46686	30450	1	0,1	35118		0,87					

Сопоставление параметров позволяет считать приоритетным первый вариант с использованием 4 котлов Beretta Novella MAXIMA 140 RAI на газовом топливе.

5.3 Использование результатов исследований в проектировании и учебной работе

Использование полученных результатов теоретических, численных и опытных исследований, а также их неоднократные испытания в производственных условиях на действующих объектах позволили ввести их в пособие по проектированию процессов и аппаратов пылегазоочистки [58]. Оно получило распространение в вузах, НИИ и проектных организациях на территории РФ и известность на Украине, в Респ. Беларусь, Болгарии. В 2001...2002г.г. некоторыми вузами РФ пособие было выставлено в сети Internet, что неконтролируемо расширило его дальнейшее использование: в ряде вузов на его основе составлены методические пособия для проведения занятий по газоочистке, материал книги активно используется некоторыми компаниями, работающими в этой области. Книга является дипломантом Издательской программы-конкурса 2003...2005г.г. Министерства образования и

науки РФ, проводившейся в честь 300-летия г. Санкт-Петербурга. В настоящее время подготовлено к изданию и находится в печати в центральном издательстве учебной литературы второе издание пособия по проектированию, переработанное и дополненное. Это служит подтверждением широкого использования результатов исследований соискателя в обучении специалистов и реальном проектировании систем пылегазоочистки по РФ.

Книга используется во многих технических вузах России (в Пензе, Казани, Екатеринбурге и ряде др. городов) для студентов энергетического и экологического профиля. Для студентов, специализирующихся по кафедрам теплоэнергетики, теплогазоснабжения и вентиляции КГАСУ, был создан ([323]) и более 20 лет успешно функционирует, в т.ч. в рамках ФГОС-3, трехсеместровый учебный курс «Процессы и аппараты газоочистки», содержащий 52 ч. лекционного курса, 50 ч. практических и 32 ч. лабораторных занятий, курсовое проектирование, ВКР бакалавриата, идет обучение по учебным программам магистратуры и аспирантуры. Обучение в рамках бакалавриата, магистратуры и аспирантуры производится на базе указанного пособия по проектированию процессов и аппаратов пылегазоочистки [58], книг «Теоретические основы пылегазоочистки» [67] и «Лабораторный практикум по процессам и аппаратам газоочистки» [271], имеющих рекомендации АСВ в качестве учебного пособия для специальности 270109 и направления 653500, а также адаптированного в по ФГОС-3 лабораторно-практического курса пылегазоочистки (квалификация бакалавр и магистр)[6, 324].

Результаты работы по научному обоснованию оценки очистных устройств и источников выбросов, а также способ их комплексной обработки с учетом загрязнения галогенсодержащими веществами и др. парниковыми газами, рекомендованы для практического применения в Государственных докладах РТ [4, 5] и признаны соответствующими современным требованиям, предъявляемым к таким выбросам, в т.ч. в связи с международными обязательствами России по РКИК ООН. Комплект технической документации по способу комплексной обработки выбросов, загрязненных галогенами, был принят к внедрению ОАО «Тасма-Холдинг» (см. раздел 5.1.3 и письмо ОАО «Тасма-Холдинг» № 146/200 от 8 июня 2009 г.) В настоящее время методика оценки источников выбросов, содержащих парниковые газы, начала использоваться в реальном проектировании (см. акты внедрения ООО «Стройпроект» и ОАО «Закамье»). Указанные проекты прошли госэкспертизу и приняты заказчиками под строительство (см. разделы 5.2.1, 5.2.2 и акты внедрения ООО «СтройГазХолдинг» и «ТатМАЗСервис»).

Соответствующие документы находятся в приложении П8.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

СИМВОЛЫ

A	–	работа, Дж
b	–	расстояние, ширина, м
C	–	концентрация газообразного загрязнителя в воздухе, мг/м ³ (в экономических расчетах – эксплуатационные расходы)
c	–	теплоемкость, Дж/(кг·°C)
D	–	диаметр, м; коэффициент диффузии, м ² /с
d	–	дифференциал; влагосодержание газа, г/(кг газа)
G	–	свободная энтальпия, Дж; расход газовой фазы, м ³ /с
g	–	массовая доля; ускорение свободного падения, м/с ²
h	–	высота, м
I	–	энтальпия, Дж
j	–	поток массы, кг/с
K	–	кинетическая энергия, Дж; коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·°C), или массопередачи, кг/(м ² ·с) (в экономических расчетах – капиталовложения)
k	–	константа скорости реакции, другие константы и коэффициенты
L	–	расход жидкой фазы, кг/с; пределы воспламенения горючих смесей, %
l	–	расстояние, длина, м
m	–	масса, кг
N	–	количество вещества, молей, ингредиентов, частей, объектов
n	–	молярная доля
p	–	давление, Па
Q	–	количество теплоты, теплота сгорания, Дж/м ³
q	–	тепловой поток, Дж (q ₃ - потери тепла от химического недожога)
R	–	газовая постоянная, Дж/(кг·K);
r	–	объемная доля, радиус.
Re	–	критерий Рейнольдса
S	–	энтропия, Дж; сила, Н
Stk	–	критерий Стокса
T	–	абсолютная температура, K
t	–	температура, °C
U	–	внутренняя энергия, Дж
V	–	объем, м ³
v	–	удельный объем, м ³ /кг
W	–	расход, м ³ /с
w	–	скорость, м/с
x	–	доля компонента в жидкой фазе
y	–	доля компонента в газовой (паровой фазе)
z	–	концентрация золы или пыли в газовой фазе, мг/м ³ ;
A	–	коэффициент избытка воздуха, самосогласованная величина
α	–	коэффициент избытка воздуха по топливу; коэффициент теплоотдачи Вт/(м ² ·°C),
β	–	вспомогательный коэффициент избытка воздуха; коэффициент массоотдачи,
γ	–	вспомогательный коэффициент избытка воздуха
ζ	–	коэффициент местного сопротивления
η	–	динамический коэффициент вязкости, Па·с; степень очистки
ι	–	коэффициент использования топлива
λ	–	коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)
μ	–	молярная масса
ν	–	кинематический коэффициент вязкости, м ² /с
ξ	–	мера реакции
Π	–	произведение
ρ	–	плотность, кг/м ³)
Σ	–	сумма

σ	–	дисперсия; поверхностное натяжение, Н/м
T	–	безразмерный временной параметр
τ	–	время, с
φ	–	относительная влажность

ИНДЕКСЫ УСЛОВИЙ

<i>b</i>	–	начальное
<i>BET</i>	–	промежуточное (между начальным и конечным)
<i>cl</i>	–	расчетное
<i>d</i>	–	динамическое
<i>e</i>	–	конечное
<i>eq</i>	–	эквивалентное, равновесное
<i>h</i>	–	высшее
<i>к</i>	–	условие калибровки
<i>int</i>	–	промежуточное
<i>low</i>	–	низшее, нижнее, меньшее
<i>lef</i>	–	левое
<i>m</i>	–	среднее
<i>max</i>	–	максимальное
<i>min</i>	–	минимальное
<i>opt</i>	–	оптимальное
<i>p</i>	–	частичное, парциальное
<i>rl</i>	–	относительное ное
<i>rig</i>	–	правое
<i>r</i>	–	реальное, фактическое, действительное, опытное, измерен
<i>th</i>	–	теоретическое
<i>tot</i>	–	полное, общее
<i>u</i>	–	верхнее
<i>uf</i>	–	равномерное (uniform)
<i>wr</i>	–	рабочее
<i>0</i>	–	нормальное (273,15 К или 0,101325 МПа)

ИНДЕКСЫ СОСТОЯНИЙ

<i>bnd</i>	–	связанное
<i>blk</i>	–	насыпное
<i>cr</i>	–	критическое
<i>fr</i>	–	свободное
<i>G</i>	–	газообразное
<i>L</i>	–	жидкое
<i>S</i>	–	твердое
<i>s</i>	–	статическое
<i>sat</i>	–	насыщенное
<i>0</i>	–	нормальное (273,15 К и 0,101325 МПа)

ИНДЕКСЫ ПРОЦЕССОВ

<i>ab</i>	–	абсорбция
<i>ad</i>	–	адсорбция
<i>bl</i>	–	кипение, котел, бойлер
<i>cln</i>	–	очистка
<i>cm</i>	–	горение
<i>cn</i>	–	конденсация
<i>ds</i>	–	десорбция
<i>ev</i>	–	испарение
<i>P</i>	–	изобарный
<i>V</i>	–	изохорный
<i>T</i>	–	изотермический

<i>I</i>	–	изоэнтальпный
<i>sat</i>	–	насыщение
<i>tch</i>	–	касание

ИНДЕКСЫ ОБЪЕКТОВ И СВОЙСТВ

<i>a</i>	–	отбросные газы, обрабатываемый воздух
<i>air</i>	–	атмосферный воздух
<i>b</i>	–	начальные, входные характеристики; балластные компоненты
<i>bar</i>	–	барометрическое давление
<i>BET</i>	–	промежуточные значения
<i>bnd</i>	–	связанная величина, связь
<i>blk</i>	–	насыпной
<i>c</i>	–	калориметрический
<i>cl</i>	–	расчетные величины
<i>d</i>	–	динамическое давление
<i>D</i>	–	диффузионный
<i>df</i>	–	дрейф
<i>dis</i>	–	дисперсный, диспергированный
<i>dk</i>	–	темный
<i>dr</i>	–	капля
<i>dry</i>	–	сухой
<i>DP</i>	–	точка росы (dew point)
<i>e</i>	–	конечные, выходные характеристики
<i>eff</i>	–	эффективные величины
<i>f</i>	–	топливо, топливный газ
<i>fg</i>	–	дым, дымовые газы
<i>fil</i>	–	заполнение; насыпной
<i>fl</i>	–	унос, летучая часть
<i>flm</i>	–	пламя
<i>fr</i>	–	свободный
<i>g</i>	–	массовый; избыточное (манометрическое, «приборное») давление (gauge pressure)
<i>i</i>	–	ингредиент, компонент
<i>ir</i>	–	орошение
<i>l</i>	–	ламинарный режим
<i>lin</i>	–	линия, линейный; длина
<i>mx</i>	–	смесь
<i>n</i>	–	мольный
<i>ob</i>	–	препятствие
<i>p</i>	–	частица
<i>pfa</i>	–	унос, летучая часть золы
<i>pyr</i>	–	пирометрический
<i>red</i>	–	приведенные значения
<i>s</i>	–	статическое давление
<i>sdl</i>	–	графическое
<i>sat</i>	–	насыщенное
<i>sf</i>	–	поверхность
<i>sep</i>	–	сепарационный
<i>sj</i>	–	пребывание
<i>ss</i>	–	межтрубное пространство (shell side)
<i>st</i>	–	пар
<i>t</i>	–	турбулентный режим
<i>tab</i>	–	табличные данные
<i>ts</i>	–	трубное пространство (tube space)
<i>v</i>	–	объемный
<i>w</i>	–	мокрый, влажный
<i>wb</i>	–	мокрый термометр (wet-bulb)

wl	–	стенка
x	–	характеристики жидкой фазы (среды)
y	–	характеристики газовой фазы (среды)

Основные сокращения

ГФУ	–	гидрофторуглероды
КПУ	–	кислородпроизводные углеводородов
КРУЭ	–	комплектное распределительное устройство элегазовое
МЧР	–	механизм чистого развития
НМЛОС	–	неметановые летучие органические соединения
ОРВ	–	озоноразрушающие вещества
ПГ	–	парниковые газы
ПГП	–	потенциал глобального потепления (Global warming potential, GWP)
ПДВ	–	предельно допустимый выброс
ПДК	–	предельно допустимая концентрация
ПСО	–	проект совместного осуществления
ПФУ	–	перфторуглероды
ПХДД	–	полихлорированные дибензо- <i>n</i> -диоксины
ПХДФ	–	полихлорированные дибензофураны
РКИК ООН	–	рамочная конвенция ООН по изменению климата
СНиП	–	строительные нормы и правила
СОЗ	–	стойких органические загрязнители
СП	–	свод правил
ТЭК	–	топливно-энергетический комплекс
ТЭС	–	тепловая электрическая станция
ЦКС	–	циркулирующий кипящий слой
CFD	–	вычислительная гидродинамика (computational fluid dynamics)

Список цитированных источников

- 1 Федеральный закон № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 года «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» (в ред. Федеральных законов [от 08.05.2010 N 83-ФЗ](#), [от 27.07.2010 N 191-ФЗ](#), [от 27.07.2010 N 237-ФЗ](#), [от 11.07.2011 N 197-ФЗ](#), [от 11.07.2011 N 200-ФЗ](#), [от 18.07.2011 N 242-ФЗ](#), [от 03.12.2011 N 383-ФЗ](#), [от 06.12.2011 N 402-ФЗ](#), [от 07.12.2011 N 417-ФЗ](#), [от 12.12.2011 N 426-ФЗ](#), [от 07.06.2013 N 113-ФЗ](#), [от 25.06.2012 N 93-ФЗ](#), [от 10.07.2012 N 109-ФЗ](#), [от 25.12.2012 N 270-ФЗ](#), [от 02.07.2013 N 185-ФЗ](#))[эл. ресурс] <http://www.referent.ru/1/208349>
- 2 Алексеенко, С. Энергосбережение – ключ к темпам роста национальной экономики / Еженедельник СО РАН «Наука в Сибири»// С. Алексеенко. – №48 – 2004. [электронный ресурс] <http://www-sbras.nsc.ru/HBC/2004/n48/f12.html>
- 3 В. Obama. Presidential Memorandum – A Comprehensive Federal Strategy on Carbon Capture and Storage, February 3, 2010 / The White House: Office of the Press Secretary [электронный ресурс] <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/presidential-memorandum-a-comprehensive-federal-strategy-carbon-capture-and-storage>
- 4 О санитарно-эпидемиологической обстановке в Республике Татарстан в 2007 году: Раздел 4 «Основные результаты научных исследований в области гигиены, эпидемиологии и профилактической медицины по Республике Татарстан» // Гос. доклад. – Казань, 2008. – с. 204.
- 5 О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2007 году: Ч. XI.2 «Научно-исследовательская работа в области охраны окружающей среды и экологической безопасности», // Гос. доклад. – Казань, 2008. – С. 459.
- 6 Зиганшин, М.Г. Лабораторно-практический курс пылегазоочистки: Часть 1. Лабораторный практикум//Методическое пособие и указания по учебной и исследовательской работе для студентов направлений 270800 «Строительство» и 280700 «Техносферная безопасность» (квалификация бакалавр и магистр)/ М.Г. Зиганшин, А. М. Зиганшин. – Казань: КГАСУ, 2012.– 188с.
- 7 Трубецкой, К. Н. Проблемы внедрения водоугольного топлива в России // Промышленные ведомости [электронный ресурс] / К. Н. Трубецкой, В.И. Мурко и др. – июнь 2004. -,№ 11-12. – С. 88-89. <http://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=120&nomer=8>
- 8 РАО "ЕЭС России". Стандарт отрасли. ОСТ 34-70-542-2001. Зола-унос тепловых электростанций. Нормативные характеристики. Дата введения 2001-07-01.
- 9 Скрыбина, Л.Я. Атлас промышленных пылей. Часть 1. Летучая зола тепловых электростанций // Обзорная информация. Промышленная и санитарная очистка газов/ Л.Я. Скрыбина. ЦИНТИХимнефтемаш. – М.: 1980. – 48 с.
- 10 Николаев, А.Н. Очистка газовых выбросов ТЭС, работающих на твердом и жидком топливе./А.Н. Николаев, А.В. Дмитриев, Д.Н. Латыпов. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2004. – 136 с.
- 11 Официальный сайт РКИК ООН (UN FCCC) [электронный ресурс] http://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_unfccc/items/4146.php
- 12 Российская Федерация. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 – 2009 гг. Часть 1. – М.: Росгидромет, 2011. – 386 с.
- 13 Росляков, П.В. Разработка теоретических основ образования оксидов азота при сжигании органических топлив и путей снижения их выхода в котлах и энергетических установках. Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: М.; МЭИ, 1993. – 40 с.
- 14 Закиров, И.А. Разработка теоретических основ и комплексное внедрение природоохранных технологий на ТЭС : Дис. ... д-ра техн. наук : М.; МЭИ, 2005. – 462 с.
- 15 Козаченко, А.Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов/ А.Н. Козаченко.— М.: Нефть и газ, 1999,— 463 с.

- 16 Li Huang, Yan Shen, Wenbo Dong, Renxi Zhang, Jianliang Zhang, Huiqi Hou. A novel method to decompose two potent greenhouse gases: Photoreduction of SF₆ and SF₅CF₃ in the presence of propene, *Journ. of Hazardous Materials*, 151 (2008), p. 323–330.
- 17 Sturges, W. T., Oram, D. E., Laube, J. C., Reeves, C. E., Newland, M. J., Hogan, C., Martinerie, P., Witrant, E., Brenninkmeijer, C. A. M., Schuck, T. J., and Fraser, P. J. Emissions halted of the potent greenhouse gas SF₅CF₃, *Atmos. Chem. Phys.*, 12 (2012), 3653–3658.
- 18 Martin Suen, Trifluoromethyl Sulfur Pentafluoride (SF₅CF₃): A Review of the Recently Discovered Super-Greenhouse Gas in the Atmosphere. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2 (2008), p.56-60.
- ¹⁹ Pepi, F., Ricci, A., Di Stefano, M., Rosi, M. Gas phase protonation of trifluoromethyl sulfur pentafluoride. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 7(2005), p.1181-1186.
- 20 Sturges, W. T., Wallington, T. J., Hurley, M. D., Shine, K. P., Sihra, K., Engel, A., Oram, D. E., Penkett, S. A., Mulvaney, R., and Brenninkmeijer, C. A. M. A Potent Greenhouse Gas Identified in the Atmosphere: SF₅CF₃, *Science* 28 July 2000, V. 289 no. 5479 (2000), p. 611–613.
- 21 Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz, and R. Van Dorland. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing, Chapter 2 in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [электронный ресурс] http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2.html, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-3.html#table-2-1
- 22 Nielsen, O.J., Nicolaisen, F.M., Bacher, C., Hurley, M.D., Wallington, T.J., Shine, K.P. Infrared spectrum and global warming potential of SF₅CF₃, *Atmos. Environ.* V. 36, Is. 7(2002), p. 1237–1240.
- 23 Ершов Ю. Б. Исследование образования хлорсодержащих компонентов топочных газов и разработка методов снижения высокотемпературной коррозии поверхностей нагрева котлов при сжигании "соленых" углей. : Дис. ... канд. техн. наук : 05.04.01 М.: ВТИ, 1993. 176 с.
- 24 Программа ООН по окружающей среде. Методическое руководство по выявлению и количественной оценке выбросов диоксинов и фуранов. 1 Выпуск. Подготовлено Подпрограммой ЮНЕП по химическим веществам. ЮМС Межорганизационная программа по обоснованному управлению химическими веществами. Совместное соглашение ЮНЕП, МОТ, ФАО, ВОЗ, ЮНИДО, ЮНИТАР и ОЭСР. Женева, Май 2003 года. – 248 с.
- 25 Корчагина О.В. Применение методов расчетного мониторинга для исследования уровня загрязнения атмосферного воздуха диоксинами [электронный ресурс]. - Режим доступа <http://www.masters.donntu.edu.ua/2012/feht/korchagina/diss/index.htm>
- 26 Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. Министерство образования и науки РФ (Утв. Председателем Правительства РФ Д. Медведевым 20.01.2014) [электронный ресурс]. - Режим доступа <http://premier.gov.ru/news/9800>; http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157978/
- 27 Свод правил СП 90.13330.2012. Электростанции тепловые. Thermal power stations. Актуализированная редакция СНиП II-58-75. М.: Изд. ФАУ «ФЦС». – 2012. – 72 с. Утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.2012 N 282 и введен в действие с 1 января 2013 г.
- 28 Свод правил СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Heating, ventilation and conditioning. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. М.: Изд. ФАУ «ФЦС». – 2012. – 76 с. Утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.2012 N 279 и введен в действие с 1 января 2013 г.
- 29 ГОСТ 17.2.1.01-76 Охрана природы. Атмосфера. Классификация выбросов по составу/ Статус: действующий, Дата актуализации текста: 22.03.2010, Дата введения в действие:

- 01.01.1977, Дата последнего изменения: 23.06.2009, переиздание с изм. 1, Список изменений: №1 от 01.01.1981 (рег. 28.02.1980) «Срок действия продлен».
- 30 Пирумов, А.И. Обеспыливание воздуха. А.И. Пирумов,— М.: Стройиздат, 1974. —207 с.
- 31 Зиганшин, М.Г., Колесник, А.А., Гимадеев, Р.А. Распылитель жидкости. А.с. №1666201, 1991г.
- 32 Макарова, В.В. Превращение хлорсодержащих и органических соединений в условиях глубокого каталитического окисления на платиновом катализаторе. //ЖПХ/ В.В. Макарова, Д.М. Калибердо, А.А. Торгашева. — 1981. — №1. — С. 12-13.
- 33 Аланова, Т.Г. Глубокое каталитическое окисление хлорсодержащих органических веществ // ЖПХ/ Т.Г. Аланова, Г.А. Иванова, В.А. Прохоров. — 1972. — №4. — С. 19-21.
- 34 Л.М.Доронина, Г.А.Иванова, Г.В.Абрамова. Определение оптимальных условий каталитического окисления хлористого алкила, дихлорэтана и хлористого бензола/ ЖПХ, 1975. —5.-с.26-27.
- 35 Иванова, Г.А. Обезвреживание газовых выбросов производства основы кинофотопленок // ЖПХ/ Г.А. Иванова, Л.М.Доронина, Л.Ф.Эшенбах, В.М.Лобанов, Т.Е.Филиппова, Н.П.Богдан. — 1979. — №2. — С. 56-57.
- 36 Менькин, Б.М., Шурыгин, А.П., Бернадинер, М.Н., Виноградов, А.А., Степ, Н.Я. Гуральник, Л.Н., Петелин, Н.В., Кацнельсон, А.О., Киханский, К.Н., Ткаченко, Г.В. Способ термического обезвреживания сточных вод. а.с. 281273 (СССР), 1970.
- 37 Дмитриев, В.И. Термическое обезвреживание абгазов производства низших хлорметанов // ЖПХ/ В.И. Дмитриев, М.Н. Коршунов, П.Ф. Негода, Н.А. Кузьменко, Д.С. Петренко. — 1978. — №4. — С. 57-58.
- 38 Дмитриев, В.В. Огневое обезвреживание хлорсодержащих отходов. //Пром. Теплотехника / В.В. Дмитриев, Г.С.Стучков. — 1988. — т.10, №5. — С.93-97
- 39 Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. — Л.: Химия, 1990. — 288 с.
- 40 Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ"Об охране окружающей среды"(ред. от 25.06.2012, с изм. от 05.03.2013). «Собрание законодательства РФ», 14.01.2002, N 2, ст. 133
- 41 Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.6.1032-01. — М.: Минздрав России, 2001.
- 42 Охрана окружающей среды. Под ред. С.В.Белова. — М. Высш. школа, 1983. 355 с.
- 43 Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. изд.: В. 2 ч. Ч. 1/Под ред. Калверта С. ИнглундаГ.М. — М.: Металлургия, 1988. — 760 с.
- 44 Беспаятнов, Г.П. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Г.П. Беспаятнов, Ю.А. Кротов. — Л.: Химия, 1985. — 528 с.
- 45 Федеральный закон "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30 марта 1999 г. N 52-ФЗ (Собрание законодательства Российской Федерации, 1999, N 14, ст. 1650)
- 46 Положение о государственном санитарно-эпидемиологическом нормировании, утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 июля 2000 г. N 554 (Собрание законодательства Российской Федерации, 2000, N 31, ст. 3295)
- 47 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338-03 (в ред. Дополнения N 2, утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача (ГГСВ) РФ от 03.11.2005 N 24, Постановления ГГСВ РФ от 03.11.2005 N 26, Дополнения N 3, утв. Постановлением ГГСВ РФ от 19.07.2006 N 15, Дополнения N 4, утв. Постановлением ГГСВ РФ от 04.02.2008 N 6, Дополнения N 6, утв. Постановлением ГГСВ РФ от 27.01.2009 N 6, Дополнения N 7, утв. Постановлением ГГСВ РФ от 09.04.2009 N 22, с изм., внесенными Постановлениями ГГСВ РФ от 17.10.2003 N 150, от 18.08.2008 N 49, от 19.04.2010 N 26, от 12.07.2011 N 98).

- 48 Приказ Минприроды РФ от 31.12.2010 N 579 "О Порядке установления источников выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, подлежащих государственному учету и нормированию, и о Перечне вредных (загрязняющих) веществ, подлежащих государственному учету и нормированию" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 09.02.2011 N 19753)
- 49 EC, 2001, Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants, OJ L 309, 27.11.2001, p. 22–30.
- 50 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone. The 1999 Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone. Convention on Long-range Trans boundary Air Pollution, Environment Division United Nations Economic Commission for Europe. http://www.unece.org/env/lrtap/multi_h1.html
- 51 Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, OJ L 152, 11.6.2008, p. 1–44.
- 52 Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air, OJ L 23, 26.1.2005, p. 3–16.
- 53 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий: ОНД-86. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 94 с.
- 54 Берлянд, М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 448 с.
- 55 Reynolds, O., Phil. Trans. Roy. Soc, London, 1895.(цит. по: Прандтль, Л. Гидроаэромеханика. /Л. Прандтль. – Ижевск, Регулярная и хаотическая динамика, 2000. – 576 с.)
- 56 Новиков, В.Ф. Исследование составов и направления обезвреживания отходов машиностроительных предприятий// Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан: Материалы IV Республиканской научной конференции./ В.Ф. Новиков, А.В. Белов, М.Р. Галлямов, М.Г. Зиганшин. – Казань, Новое Знание, 2000.– с.143.
- 57 Белоусов, В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. /В.В. Белоусов. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
- 58 Зиганшин, М.Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. /М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, В.Н. Посохин. – М.: Экопресс – ЗМ, 1998. – 505 с.
- 59 Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. /Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1978. – 831 с.
- 60 Зиганшин, М.Г. Системы очистки выбросов ТЭС: ч.1. Оценка эффективности, теоретические основы и критерии оценки: Монография/ М.Г. Зиганшин.– Казань: Изд. КГЭУ, 2013. – 252 с.
- 61 Николаев, Н.А. Исследование и расчет ректификационных и абсорбционных аппаратов вихревого типа. Автореф. дисс...д.т.н. Казань, 1974. – 32с.
- 62 Ершов, А.И. Разработка, исследование и применение элементарных ступеней контакта с взаимодействием фаз в закрученном потоке. Автореф. дисс...д.т.н. Л, 1975. – 36с.
- 63 Приходько, В.П. Принципы расчета и конструирования прямоточных центробежных аппаратов со статическими завихрителями. Автореф. дисс...д.т.н. М, 1989. – 42с.
- 64 Останин, Л.М. Разработка и расчет вихревых аппаратов контактных устройств с повышенной удерживающей способностью. Автореф. дисс...к.т.н. Казань, 1987. – 24с.
- 65 Еремкин, А.И. Оптимизация конструкций циклонных и вихревых сепараторов по расчетному параметру эффективности отделения взвешенных частиц // Высшее строительное образование и современное строительство в России и зарубежных странах: Сб. статей по материалам 3-го технического семинара в г. Пекине и г. Шанхае/ А.И. Еремкин, М.Г. Зиганшин, А.Н. Кошев. – Самарск. Гос. Арх.-строит. Ун-т. – Москва-Самара-Пекин-Шанхай, 2008. – С. 73-80(2008)
- 66 Дмитриев, А.В. Расчеты степени очистки аэрозоля в аппаратах с инерционным принципом осаждения и вращательным движением потока/Нижекамский химико-технол. ин-т Казан. гос.

- технол. ун-та. – Нижнекамск – 2008. – 24 с.: - 4 ил. – Библиогр.: 9 назв. – Рус. / А.В. Дмитриев, М.Г. Зиганшин. – Деп. в ВИНТИ 24.07.2008, №644–В2008
- 67 Зиганшин, М.Г. Теоретические основы пылегазоочистки./ М.Г. Зиганшин. – Казань: Изд. КГАСУ, 2005. – 262 с.
- 68 Our Common Future: World Comission on Environment and Development. – Oxford, New York: Oxford University Press, 1987 (см. также перевод: Наше общее будущее. Доклад Международной комиссии по окружающей среде и развитию (МКОСР)/ Под ред. Евтеева С.А., Перелета Р.А. – М.: Прогресс, 1989. – 376 с.).
- 69 Зиганшин, М.Г. Анализ способов обезвреживания хлорсодержащих компонентов отбросных газов / Тепломассообмен и гидромеханика элементов систем отопления, вентиляции, утилизации отходов: Отчет о научно-исследовательской работе (промежуточный):Тема №43-91:ВНТИЦентр, № гос. регистрации 01860050341 / М.А.Валиуллин, В.Н.Волков, М.Г. Зиганшин, А.И.Нарбеков и др.– Казань: КИСИ, 1991 г. – с.30-36.
- 70 Леонтьева, С.В. Методы обработки воздуха с галогенсодержащими веществами// Сб. научн. тр. докторантов и аспирантов/ С.В. Леонтьева, М.Г. Зиганшин. - Казань: КГАСУ, 2007. – С. 151-154
- 71 М.Лазарев. Каталитическая доочистка отходящих газов битумного производства/ Промышленная и санитарная очистка газов. - М.: ЦНИИТИНефтехим, 1975, с. 11-14.
- 72 Ch. C. Hugher , A. Gaines . Pollution problem is speed by Shell and Tube changer /Chem. прос, 1979, №8 . p. 26
- 73 Н.П.Макаревич, В.В.Печковский. Утилизация технологических фторсодержащих газов за рубежом/ Химическая промышленность за рубежом. – М.: НИИТЭХим, 1982. - 7(235). с. 33
- 74 M.F. Nathan. Choosing a process poor Chloride removal. Chemical Engineering , 1978, v. 85,№ 3.p. 93-100.
- 75 М.И.Петрова, К.М.Николаев. Исследование адсорбции некоторых хлористых углеводородов. -М.: НИИТЭХим, 1980. -5(30). - с. 7.
- 76 М.И.Петрова, К.М.Николаев. Исследование адсорбции некоторых хлористых углеводородов промышленными активными углями в присутствии паров воды/ ЖПХ, 1982. - 55, .№7. -с. 151-152I.
- 77 В.И.Тарасевич, Е.Г.Сивалов, Б.М.Кац, Р.И.Малиновский. Адсорбция тетрафторида кремния, хлористого водорода и аммиака природным дисперсионным материалом/ ЖПХ, 1982, -55, №2,- с. 440-445.
- 78 R.W. Williams, K.White . From 95-98% of Solvent recovered with activated carbon Systems. / Chem. прос., 1978, v. 41, № 4. p. 18-19.
- 79В.М. Андреева, В.П.Приходько, А.М.Замятина. Очистка вентиляционных выбросов от паров соляной кислоты/Хим. пром., 1980. с 10-11
- 80К.Б.Светлов, З.Р.Берлин. Очистка и хлорирование абгазного хлористого водорода за рубежом/ Химическая промышленность за рубежом. -М.: НИИТЭХим, 1972. -7, -с. 54.
- 81L.C. Hardison, E.J.. Dowd . Emission control via fluidized bed Oxidation/Chemical Engineering Progress , 1977, V. 73, № 8. p.31- 35
- 82 Зиганшин, М.Г., Кривоногов, Б.М. Термообезвреживание жидких отходов, содержащих хлорсодержащие компоненты.// Гидромеханика отопительно-вентиляционных устройств: Межвуз. сб. научн. тр./ М.Г. Зиганшин, Б.М. Кривоногов. – Казань: КИСИ, 1989. – с.95 – 98.
- 83 Ошин, Л.А. Промышленные хлорсодержащие продукты./ Л.А. Ошин. – М.: Химия, 1978. – 656 с.
- 84 Г.П.Гейд, Н.А.Гуревич, В.И.Дмитриев, Б.Н.Соляник. Образование окиси азота при сжигании хлорсодержащих отходов, содержащих связанный азот/ ЖПХ, 1981, 2. с. 58-59
- 85 Зиганшин, М.Г. Влияние теплотехнических характеристик горючих компонентов атмосферных выбросов на процессы термообезвреживания// Актуальные экологические

- проблемы Республики Татарстан: Тезисы докладов II Республиканской научной конференции./ М.Г. Зиганшин. – Казань, АН Татарстана, 1995. – с.101.
- 86 Зиганшин, М.Г. Обработка загрязненного воздуха и вентиляционных выбросов с органическими загрязнителями // Сб. научн. тр. докторантов и аспирантов/ М.Г. Зиганшин, С.В. Леонтьева. - Казань: КГАСУ, 2007. – С. 155-161
- 87 R. Friendmund. Entwicklungstendenzen bei Dreizug Kesseln. – Energ. Und Techn., 1971, 23, 3. S. 83-86.
- 88 K. Purps. Moderne Heiz Kessel und Feuerungen. Instrall – DKZ, 1971, 91, 20. S. 508-514
- 89 Зиганшин, М.Г. Техничко-экономическая эффективность применения наддува в производственных и отопительных котельных./ М.Г. Зиганшин, Б.М Кривоногов. – Совершенствование сжигания газа и мазута в топках котлов и снижение вредностей в продуктах сгорания.:Сб. трудов ЛИСИ №99. – Л.: ЛИСИ, 1975. – с. 28-33
- 90 R. Leicester. Steam Package for alb seasons/ - Engineering, 1971, 211, №6. p. 569-662
- 91 Зиганшин, М.Г. Преимущества производственно-отопительных котлов, работающих под наддувом./ М.Г. Зиганшин, Б.М Кривоногов. – Отопление, вентиляция, теплогазоснабжение и теплотехника. Краткие содержания докладов к XXXI научн. конф. ЛИСИ. – Л.: ЛИСИ, 1973. – с.67-69.
- 92 Walsh, W.H., Waddel, J.A. Obtaining and Maintaining Low Excess Air operating on an industrial Boiler. Proc. Amer. Power Conf. V/33. Chicago, Jul. 1971. P. 678-686
- 93 . Poppinga, W.F. Betrachtungen uber wirtschaftliche Gas Heizzentralen im Wohnungsbau. Oil Gas und Feuerungstecynik, 1972,17, 3, s. 77-85
- 94 Кривоногов, Б.М. Анализ факторов, влияющих на образование окислов азота при сжигании природного газа /. Б.М Кривоногов,. Е.П. Шматов, В.В. Дунин, М.Г. Зиганшин. – Совершенствование сжигания газа и мазута в топках котлов и снижение вредностей в продуктах сгорания.:Сб. трудов ЛИСИ №99. – Л.: ЛИСИ, 1975. – с. 3-10
- 95 Plumley, A.L. Fossil Fuel and the Environment Present Systems and their Emission. Combustion (USA), 43, 4, p.36-43(1971).
- 96 Зельдович, Я.Б. Окисление азота при горении./ Я.Б. Зельдович, П.Я. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: 1947.
- 97 Марковский, А.В. Исследование процессов получения газозоудного теплоносителя. Автореф...канд. дисс. Киев, 1968.
- 98 Кривоногов, Б.М. Совместное сжигание природного газа и водных эмульсий горючих промстоков и его влияние на теплообмен в топке и газоходах котлов ДКВР /. Б.М Кривоногов, М.Г. Зиганшин,. А.А. Товаровский. – Совершенствование сжигания газа и мазута в топках котлов и снижение вредностей в продуктах сгорания.:Сб. трудов ЛИСИ №99. – Л.: ЛИСИ, 1975. – с. 51-58
- 99 Коробова, М.Н. Метод сжигания фенолов, содержащихся в стоках промышленных предприятий/ М.Н Коробова,. А.П Финягин, - Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения: ИГИ АН СССР. – М.: Наука, 1972. – с.127-136
- 100 Мусаев, А.М., Зиганшин, М.Г., Алиев, Ф.Ш., Гасимов, Р.Ф. Способ слоевого сжигания жидких и газообразных отходов и устройство для его осуществления. А.с. СССР № 823759, 1980.
- 101 Алексеев, А.М., Иванов, В.М., Френкина, З.И. Исследование процесса горения газообразного топлива в потоке совместно с испарением распыленной воды в парогазогенераторе/ А.М. Алексеев, В.М. Иванов, З.И. Френкина. - Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения: Труды ИГИ АН СССР, т. XIX, с. 66-94 (1962).
- 102 Репин, А.П. Децентрализованные источники тепловой энергии и методы оценки их эффективности//Гидромеханика отопительно-вентиляционных и газоочистных устройств:

- Межвуз. сб. научн. тр./ А.П. Репин, Ю.А. Ногтев, М.Г. Зиганшин – Казань: КГАСА, 2001 – с.3 – 10.
- 103 Новиков, В.Ф., Маслихов, И.П., Зиганшин, М.Г. Снижение вредных выбросов при сжигании газа, твердого и жидкого топлива в топках теплогенераторов// Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан: Материалы IV Республиканской научной конференции./ В.Ф. Новиков, И.П. Маслихов, М.Г. Зиганшин. – Казань, Новое Знание, 2000.– с.143-144.
- 104 The impact of international shipping on European air quality and climate forcing/EEA, Copenhagen, Technical report No 4/2013. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. – 88 p.
- 105 Шурпяк, В.К. Применение альтернативных видов энергии и альтернативных топлив на морских судах. Разработка нормативных требований по их применению. [электронный ресурс]// В.К. Шурпяк: Семинар: СПГ как альтернативное топливо для морских судов. – С.-Пб.: – ГМА им. Адм. С.О. Макарова, 24.04.12/ <http://www.korabel.ru/filemanager/OTHER/0/0/3.pdf>
- 106 Официальный сайт «ТЕЦ Марица изток 2» ЕАД, [электронный ресурс]<http://www.tpp2.com/page/about-us.html>
- 107 Сайт Министерства экономики, энергетики и туризма Болгарии [электронный ресурс]<http://www.stroy-instrum.ru/energy/energy/docs.html?id=270929>
- 108 Базаянц, Г.В. Оценка выбросов парниковых газов при десульфуризации дымовых газов ТЭС углеродсодержащими сорбентами [электронный ресурс]// Г.В. Базаянц, О.Л. Дариенко, М.Ю. Медведева/ <http://www.sworld.com.ua/konfer21/75.htm>
- 109 Алексеенко, С.В. Энергосбережение – ключ к темпам роста национальной экономики [электронный ресурс] // С.В. Алексеенко / <http://www-sbras.nsc.ru/HBC/2004/n48/f12.html>
- 110 Чичирова, Н.Д. Фонтанирующий слой в гетерогенных процессах современных технологий топливного цикла ТЭС: Часть 1. Десульфуризация и газификация твердого топлива// Труды Академэнерго /Н.Д. Чичирова, М.Г. Зиганшин. – 2013. – №2. – С.41-50.
- 111 Семенов, Н. Н. Цепные реакции/Н. Н. Семенов. – М.: Наука,1986. – 535 с.
- 112 Вознесенский, Н.П. Легкие газогенераторы. Исследование работы, теория и расчет : диссертация кандидата технических наук / Н.П. Вознесенский. – М.-Л. : Изд-во Объединенное научно-техническое, 1938 . – 103 с.
- 113 Мальцев, В.М. Основные характеристики горения./ В.М. Мальцев, М.Н. Мальцев, Л.Я. Кашпоров. – М.: Химия, 1977. – 320 с.
- 114 Кодолов, В.Н. Замедлители горения полимерных материалов./ В.Н. Кодолов. – М.: Химия, 1980. – 274 с.
- 115 Градус Л.Я., Тарнавский И.Л., Иванова М.И. Эксплуатация газоочистного оборудования на машиностроительных предприятиях/ Л.Я. Градус, И.Л. Тарнавский, М.И. Иванова. – М.: Машиностроение, 1988. 216 с.
- 116 Термические методы обезвреживания отходов/Под ред. К.К. Богушевской, Г.П. Беспямятнова. – Л.: Химия, 1975. – 176 с.
- 117 Вторжение в природную среду. – М.: Прогресс, 1983. – 238 с.
- 118 А.И. Скрыпник. Очистка вентиляционных выбросов от химических вредных веществ/Уч. пособие. – Воронеж, изд. ВГАСУ, 2002. – 117 с.
- 119 Зиганшин, М.Г. Разработка показателей эффективности очистных систем // Сб. научн. тр. докторантов и аспирантов/ М.Г. Зиганшин, С.В. Леонтьева. – Казань: КГАСУ. – С.84-89 (2008)
- 120 Беспямятнов, Г.П., Богушевская, К.К., Беспямятнов, А.В. и др. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе и воде/ Г.П. Беспямятнов, К.К. Богушевская, А.В. Беспямятнов и др. – Л.: Химия, 1972. – 375 с.
- 121 Термические методы обезвреживания отходов/Под ред. К.К. Богушевской, Г.П. Беспямятнова. – Л.: Химия, 1975. – 176 с.

- 122 Еремкин, А.И. Совершенствование оценки санитарно-гигиенической и энергоэкологической эффективности систем очистки // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета/, А.И. Еремкин, М.Г. Зиганшин..– 2007.– № 2(8). – С. 117-121
- 123 Еремкин, А.И. Энергоэкологическая эффективность очистки выбросов при наличии парниковых газов // Региональная архитектура и строительство /А.И. Еремкин, М.Г. Зиганшин./ – 2007. – №2 (3). – С. 15-19
- 124 Торочешников, Н.С. Техника защиты окружающей среды/ Н.С. Торочешников, А.К. Родионов, Н.В. Кольцов, В.Н. Клушин. – М.: Химия, 1981. – 368 с
- 125 Кузнецов, И.Е. Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами химических предприятий/ И.Е. Кузнецов, Т.М. Троицкая. – М.: Химия, 1979. – 344 с.
- 126 Коузов, П.А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности / П.А. Коузов, А.Д. Малыгин, Г.М. Скрыбин. – Л.: Химия, 1982. – 256 с.
- 127 Еремкин, А.И. Уточнение эффективной высоты выброса и определение санитарно – гигиенической, экологической и технической эффективности его очистки// Журнал экологии и промышленной безопасности/ А.И. Еремкин, А.М. Зиганшин, М.Г. Зиганшин. – 2007. – № 5(35). – С. 65-68.
- 128 Еремкин, А.И. Комплексная оценка санитарно – гигиенической, экологической и технической эффективности систем очистки производственных выбросов//Казанский медицинский журнал/ А.И. Еремкин, А.В. Иванов, М. Г. Зиганшин, А.М. Зиганшин. – 2008. – т. 89, №4. – С. 529-533.
- 129 Еремкин, А.И. Нормирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу: Уч. пособие/ А.И. Еремкин, И.М. Квашнин, Ю.И. Юнкеров. – М.: изд. АСВ, 2000. – 176 с.
- 130 Шкаровский, А.Л. Повышение эффективности защиты воздушного бассейна при сжигании газообразного и жидкого топлива. Автореф. дисс...д.т.н. С.-Пб., 1997. – 48с.
- 131 Чичирова, Н.Д. Оценки эффективности теплоэнергетических объектов: Часть 1. Энергетические и экологические показатели с учетом выброса токсичных ингредиентов и CO₂//Надежность и безопасность энергетики/ Н.Д. Чичирова, М.Г. Зиганшин. – 2013. – № 2 (21). – С. 46-49.
- 132 Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. — Л.: Химия, 1987. — 576 с.
- 133 Прандтль, Л. Гидроаэромеханика: Пер. с нем. / Л. Прандтль. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576с.
- 134 Berljand, M.E., Genihovich, E.L. Some features of turbulent diffusion and air pollution in the stratified conditions. Int. Symp. on stratified Flows, Novosibirsk, 1972.
- 135 Зилитинкевич, С.С. Динамика пограничного слоя атмосферы. С.С. Зилитинкевич. – Л.: Гидрометиздат, 1970.
- 136 Fully resolved simulations of particle-turbulence interaction. T. M. Burton, and J. K. Eaton. Report No. TSD-151, Stanford University, Stanford, USA, 2003, 187 p.
- 137 Hu, H. H., N. A. Patankar, and M. Y. Zhu. Direct numerical simulation of uid-solid systems using the arbitrary Lagrangian-Eulerian technique. J. Comput. Phys. (2001), 169 (2), pp. 427-462
- 138 Nirschl, H., H. A. Dwyer, and V. Denk (1995). Three-dimensional calculations of the simple shear flow around a single particle between two moving walls. J. Fluid Mech. (1995), 283, pp. 273-285
- 139 Dwyer, H. A., K. DeBus, and N. Shahcheraghi. The use of overset meshes in particle and porous media three-dimensional flows. Int. J. Numer. Methods Fluids (1999)31 (1), pp. 393-406
- 140 Shahcheraghi, N. and H. A. Dwyer. Moving and rotating sphere in the thermal entrance region of a heated pipe. ASME J. Heat Transfer (2000), 122, pp. 336-344

- 141 Glowinski, R., T. W. Pan, T. I. Hesla, D. D. Joseph, and J. Periaux. A fictitious domain approach to the direct numerical simulation of incompressible viscous flow past moving rigid bodies: application to particulate flow. *J. Comput. Phys.* (2001), 169 (2), pp. 363-426
- 142 Hill, R. J. and D. L. Koch. Moderate-Reynolds-number flow in a wall-bounded porous medium. *J. Fluid Mech.* (2002), 453, pp. 315-344
- 143 Nourgaliev, R. R., T. N. Dinh, T. G. Theofanous, and D. Joseph. The lattice Boltzmann equation method: theoretical interpretation, numerics and implications. *Int. J. Multiphase Flow* (2003), 29 (1), pp. 117-169
- 144 Maxey, M. R. and J. J. Riley. Equation of a small rigid sphere in a nonuniform flow. *Phys. Fluids* (1983), 26 (4), pp. 883-889
- 145 Bagchi, P. and S. Balachandar (2003). Inertial and viscous forces on a rigid sphere in straining flows at moderate Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* 481, pp. 105-148
- 146 Maxey, M. R.. The equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow or unsteady flow. *Gas-Solid Flows. ASME/FED*, (1993), V. 166, p. 57-62
- 147 Kim, I., S. Elghobashi, and W. A. Sirignano. On the equation for spherical-particle motion: effect of Reynolds and acceleration numbers. *J. Fluid Mech.* (1998), 367, pp. 221-253
- 148 Boivin, M., O. Simonin, and K. D. Squires (1998). Direct numerical simulation of turbulence modulation by particles in isotropic turbulence. *J. Fluid Mech.* (1998), 375, pp.235-263.
- 149 Чичирова, Н.Д. Принципы численного моделирования вихревых аппаратов для очистки дымовых газов ТЭС на твердом топливе //Энергосбережение и водоподготовка/Н.Д. Чичирова, М. Г. Зиганшин. – 2013. - №6(86). – С. 49-53.
- 150 Еремкин, А.И. Степень инерционного осаждения взвешенных частиц в циклонных и вихревых сепараторах. Безразмерные параметры эффективности сепарации взвешенных частиц//Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета / А.И. Еремкин, М.Г. Зиганшин. – 2009. – №2(14). – С. 64-71
- 151 Еремкин, А.И. Степень инерционного осаждения взвешенных частиц в циклонных и вихревых сепараторах. Верификация параметров эффективности //Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета / А.И. Еремкин, М.Г. Зиганшин. – 2009. – №3(15). – С. 137-145
- 152 Скрыбина, ЛЯ. Атлас промышленных пылей: ч. I, II, III. — М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1980 — 1982. — 44 с.
- 153 Алиев, Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справочник. Г.М.-А. Алиев.— М.: Металлургия, 1986. — 628 с.
- 154 Ейтс, Дж. Основы механики псевдооживления с приложениями. Дж. Ейтс. – М.: Мир, 1986. – 288 с.
- 155 Дмитриев, А.В. Метод расчетного определения степени очистки аэрозолей в полых вихревых аппаратах // Инновации и высокие технологии XXI века. Материалы Всероссийской научно-практической конференции в 2-х томах. Том 1. Нижнекамск, Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) КГТУ 28-30 апреля 2009 г. / А.В Дмитриев, М.Г.Зиганшин. – С. 17-20 (2009)
- 156 Зиганшин, М.Г. Очистка воды от жидких взвешенных частиц в вихревых сепараторах // Экология и промышленность России/ М.Г. Зиганшин, Д.Д. Латыпов, Д.В. Алексеев. – 2008. – Декабрь. – С. 12-15
- 157 Зиганшин, М.Г. Расчет эффективности сепарации потоков эмульсий в аппаратах вихревого типа//Промышленная энергетика/ М.Г. Зиганшин, А.В. Дмитриев. – 2009. – №3. – С. 51-56
- 158 Справочник по пыле- и золоулавливанию/ Под ред. Русанова А.А. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 312 с.
- 159 Сена, Л.А. Единицы физических величин и их размерности./ Л.А. Сена. – М.: Наука, 1977. – 336 с.

- 160 Овчинников, А.А. Динамика двухфазных закрученных турбулентных течений в вихревых сепараторах./ А.А. Овчинников. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2005. – 288с.
- 161 Лебедев П.Д., Щукин АА. Промышленная теплотехника. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1956. — 384 с.
- 162 Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: — М.: Энергоиздат, 1981. — 416 с.
- 163 Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию/ Под ред. Ю.И. Дытнерского. — М.: Химия, 1991. — 496 с.
- 164 Флад, Э. Термодинамическое описание адсорбции по Гиббсу и Поляни: Межфазовая граница газ – твердое тело/ Под ред. Э.Флада. Пер. с англ.– М.: Мир, 1970. – 434 с.
- 165 Бенсон Г., Юн К. Поверхностная энергия и поверхностное натяжение кристаллических твердых тел. Межфазовая граница газ – твердое тело/ Под ред. Э.Флада. Пер. с англ. – М.: Мир, 1970.- 434 с.
- 166 Гиббс, Дж. В. Термодинамические работы. – М.-Л.: Гос. изд. технико-теоретич. литературы, 1950. – 284 с.
- 167 Брунауэр, С. Адсорбция газов и паров. М.: ИЛ, 1948. – 165 с.
- 168 Русанов, А.И. Термодинамика поверхностных явлений. – Л.: Изд. ЛГУ, 1960. – 179с.
- 169 Брунауэр, С., Коупленд, Л., Кантро, Д. Теории Лэнгмюра и Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ): Межфазовая граница газ – твердое тело/ Под ред. Э.Флада. Пер. с англ.– М.: Мир, 1970. – с. 77 – 97.
- 170 Зиганшин, М.Г. Анализ термодинамических моделей адсорбции по Лэнгмюру и БЭТ//Сб. научн. тр. докторантов и аспирантов/ М.Г. Зиганшин. – Казань: КГАСУ. – С. 90-96 (2008)
- 171 Гиршфельдер, И.О., Кертисс, К.Ф., Бэрд, Р.Б. Молекулярная теория газов и жидкостей. – М.: ИЛ, 1961. – 220 с.
- 172 Блохинцев Д.Н. Основы квантовой механики. – М.: Наука, 1976.– 664 с.
- 173 Жданов Г.С., Хунджуа А.А. Лекции по физике твердого тела. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 231 с.
- 174 Суханов А.Д. Лекции по квантовой физике.–М.: Высш. шк.,1991.–383с.
- 175 Зиганшин, М.Г. Анализ упрощений в задачах межмолекулярного взаимодействия газа и поверхности//Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета / М.Г. Зиганшин. – 2008. – № 2(10) – С. 96-99
- 176 Кроуэлл, А. Силы взаимодействия между молекулами газа и поверхностью твердого тела. Межфазовая граница газ – твердое тело/Под ред. Э.Флада. Пер. с англ. – М.: Мир, 1970. – с. 150-171.
- 177 Романков, П.Г., Рашковская, Н.Б.Сушка во взвешенном состоянии. -Л.: Химия, 1979. - 272 с.
- 178 М.И.Рабинович. Тепловые процессы в фонтанирующем слое. - Киев: Наукова думка, 1977. - 174 с.
- 179 Mathur, K.V., Gishler, P.E. A Technique for Contacting Gases with Coarse Solid Particles, Amer. Inst. Chem. Eng. J., 1955, v.1, № 2, p. 157-164.
- 180 Гельперин, Н.И., Айнштейн, В.Г., Кваша, В.Б. Основы техники псевдооживления. – М.: Химия, 1967. 328 с.
- 181 Зиганшин, М.Г. Характеристики модели фонтанирующего режима работы адсорбционного аппарата / Разработка конструкций и методов расчета элементов систем отопления, вентиляции, утилизации отходов // Отчет о научно-исследовательской работе (заключительный):Тема №43-91:ВНТИЦентр, № гос. регистрации 01950004623/. М.А.Валиуллин, В.Н.Волков, М.Г. Зиганшин, А.И.Нарбеков и др.– Казань: КГАСА, 1995 г. – с.40-49.

- 182 Чичирова, Н.Д. Фонтанирующий слой в гетерогенных процессах современных технологий топливного цикла ТЭС: Часть 2. Сжигание твердого топлива. Обработка выбросов низких источников // Труды Академэнерго /Н.Д. Чичирова, М.Г. Зиганшин. – 2013. – №2. – С.51-64.
- 183 Губин, С.П. Химия кластеров. Основы классификации и строение/ С.П. Губин. – М.: Наука, 1987. – 263 с.
- 184 Massimila, L., Donsi, G. Sound Assisted Aeration of Beds at Cohesive Solids. Powder Tech., 1976, 15, p.253
- 185 Андрианов, Е.И. Методы определения прочностных реологических характеристик порошкообразных материалов. - М.: Химия, 1981. - 256 с.
- 186 Зиганшин, М.Г. Расчеты параметров устройств с фонтанирующим полидисперсным материалом для систем топливоподготовки ТЭС//Проблемы энергетики/ М.Г. Зиганшин. – 2013. – №1-2. – С. 39-47.
- 187 Зиганшин, М.Г. Исследование режима фонтанирования моно- и полидисперсного адсорбента в цилиндроконическом аппарате.// Гидромеханика отопительно-вентиляционных устройств: Межвуз. сб. научн. тр./ М.Г. Зиганшин, Б.М. Кривоногов. – Казань: КГАСА, 1997. – с.3 – 10.
- 188 Премет, Г.К. Об улавливании вредных летучих веществ в производстве олиф./ Г.К. Премет – Лакокрасочные материалы и их применение,№1 (1963)
- 189 Скорняков, В.В., Сахарнов, А.В., Ткаченко, Г.А., Шиллер, С.И. Новый метод очистки газовых выбросов в производстве алкидных и полиэфирных смол./ А.В. Сахарнов, Г.А. Ткаченко, С.И. Шиллер, – Лакокрасочные материалы и их применение,№1 (1971).
- 190 Зиганшин, М.Г. Сжигание вредных парообразных выбросов в топках котлов/ М.Г. Зиганшин. – Совершенствование сжигания газа и мазута в топках котлов и снижение вредностей в продуктах сгорания.: Межвуз. сб. трудов №1 – Л.: ЛИСИ, 1976. – с. 20-22
- 191 Сахарнов, А.В., Скорняков, В.В. Очистка газовых выбросов в производстве полиэфирных и алкидных смол./ А.В. Сахарнов, В.В. Скорняков . – Лакокрасочные материалы и их применение,№6, с.86 (1967)
- 192 Зиганшин, М.Г., Стаскевич, Н.Л. Сжигание акролеина и фенола в пламени природного газа/ М.Г. Зиганшин, Н.Л. Стаскевич. – Совершенствование сжигания газа и мазута в топках котлов и снижение вредностей в продуктах сгорания.: Межвуз. сб. трудов №1 – Л.: ЛИСИ, 1976. – с. 22-25
- 193 Данилевич, Ю.И., Замкевич, Б.М. Установка для очистки токсичных примесей в газовых выбросах производства алкидных лаков и смол. Инф. письмо №13(196) ИГ АН УССР. – Киев, 1971.
- 194 Зиганшин, М.Г. Влияние теплотехнических характеристик горючих компонентов атмосферных выбросов на процессы термообезвреживания.// Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан: Материалы II Республиканской научной конференции./ М.Г. Зиганшин. – Казань, АН Татарстана, 1995. – с.72-73.
- 195 Ахмедов Р. Б., Гольдберг И. М., Яковлев В. А. Применение горелок с диффузионным регулированием для сжигания газа. «Промышленная энергетика», 1975, № 10. с. 28-33
- 196 Ахмедов Р.Б, Гольдберг И.М., МингареевФ. М. Газовая горелка Авторское свидетельство № 373486. - Открытия.Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки. 1973, №14.
- 197 Ахмедов Р.Б, Гольдберг И.М., Яковлев В. А. Совместное сжигание природного газа и отбросных газов химических производств // Повышение качества сжигания топлива и охрана воздушного бассейна от загрязнения вредными выбросами ТЭС / Р.Б Ахмедов, И.М. Гольдберг, В. А. Яковлев. – Л.: НТОЭиЭП, 1977. – с. 46-48
- 198 Использование газа в народном хозяйстве/ Реферативная информация. – М.: ВНИИЭГазпром, 1979, №2, с.24-35.

- 199 Стаскевич НЛ., Северинец Г.Н., Вигдорчик Д.Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. — Л.: Недра, 1990. — 762 с.
- 200 Использование газа в народном хозяйстве/ Реферативная информация. – М.: ВНИИЭГазпром, 1979, №4, с. 25-35.
- 201 Использование газа в народном хозяйстве/ Реферативная информация. – М.: ВНИИЭГазпром, 1979, №5, с. 27-33.
- 202 Кривоногов Б.М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды. - Л.: Недра, 1986. - 280 с.
- 203 Использование газа в народном хозяйстве/ Реферативная информация. – М.: ВНИИЭГазпром, 1979, №9, с.24-38
- 204 Меерсон М.Ш., Пушкина М.В. Стандартизация блочных инжекционных горелок. - М., ВНИИЭгазпром, 1981. - с.15-19.
- 205 Зиганшин, М.Г. Газогорелочное устройство для термообработки отбросных газов / Теплообмен и гидромеханика элементов систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, пыли – и газоочистки // Отчет НИР (промежуточный): ВНИИЦентр, № гос. регистрации 01860050341/ М.А.Валиуллин, В.Н.Волков, М.Г. Зиганшин, Р.Н. Максудов, А.И. Нарбеков и др. – Казань, КИСИ, 1991. – 43с
- 206 Зиганшин, М.Г., Белов, А.В., Александров, Ю.Б. Горелочное устройство. Патент РФ на изобретение № 2216689, 2003.
- 207 Давыдов А.П., Зиганшин М.Г. Горелочное устройство. А.с. № 1416801, 1988.
- 208 Зиганшин, М.Г., Кривоногов, Б.М. Термообезвреживание атмосферных выбросов химических предприятий с содержанием хлорсодержащих компонентов// Повышение качества сжигания топлива и охрана окружающей среды от загрязнения вредными выбросами ТЭС и крупными промпредприятиями. / М.Г.Зиганшин, Б.М.Кривоногов. – Л.: НТОЭиЭП, 1988. – с.74-76.
- 209 А.с. 1395899 (СССР). Способ термического обезвреживания выбросов, содержащих хлорсодержащие компоненты, Зиганшин М.Г., Алещенко И.С., Павлов Л.В. 1988.
- 210 Дмитриев, А.В. Повышение эффективности обработки галогенсодержащих производственных выбросов//Химическая промышленность сегодня/ А.М. Зиганшин, М.Г. Зиганшин. – 2009. – №6. – С. 21-27
- 211 Методы расчета турбулентных течений / Под ред. В. Колльмана. – М.: Мир, 1984.- 464 с.
- 212 Hanjalic K. and Louder V.E., Report TF 78/8, University of California of Davis (1978).
- 213 Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 1. Пер. с англ./ К. Флетчер.– М.: Мир, 1991. – 504 с.
- 214 Волчков, Э.П., Семенов, С.В. Основы теории пограничного слоя./ Э.П.Волчков, С.В.Семенов.– Новосибирск, изд-во РАН, 1994. – 224 с.
- 215 Tollmien W., Ein allgemeines Kriterium der Instability laminarer Geschwindigkeitsverteilungen. I. Mitteilung, Gottinger, Nachr., Math.-Phys. Klasse, Fachgruppe I, v. I, 1935, s. 79.
- 216 Колмогоров А.Н., Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса. ДАН СССР, т. XXX (1941), №4.
- 217 Миллионщиков М. Д. Вырождение однородной изотропной турбулентности в вязкой несжимаемой жидкости. ДАН СССР, т. XXII (1939), №5
- 218 Ландау Л., К проблеме турбулентности. ДАН СССР, т. XLIV (1944), №8.
- 219 Tollmien W., Uber die Entstehung der Turbulenz. I. Mitteilung, Gottinger, Nachr., Math.-Phys. Klasse, 1929, s. 21
- 220 S. Balachandar and John K. Eaton, Turbulent Dispersed Multiphase Flow. Annu. Rev. Fluid Mech. 2010. 42:111–133
- 221 T. Tanaka and J.K. Eaton, Classification of Turbulence Modification by Dispersed Spheres Using a Novel Dimensionless Number. PRL, 101, 114502 – 1-4 (2008).

- 222 Bagchi P, Balachandar S. Response of the wake of an isolated particle to an isotropic turbulent flow. *J. Fluid Mech.* 2004. 518:95–123
- 223 Chen JH, Faeth GM. 2001. Continuous-phase properties of homogeneous particle-laden turbulent flows. *AIAA J.* 2001. 39:180–183
- 224 Rogers CB, Eaton JK. The effect of small particles on fluid turbulence in a flat-plate, turbulent boundary layer in air. *Phys. Fluids A* 1991.3:928–937
- 225 Зиганшин, М.Г. Эффективность очистки газовых выбросов парогенераторов ТЭС в аппаратах вихревого типа//Пром. энергетика / М.Г. Зиганшин, П.В. Ежов, А.В. Дмитриев. – 2008. – № 9. – С. 49 – 54.
- 226 Зиганшин, М.Г. Расчет эффективности сепарации потоков эмульсий в аппаратах вихревого типа // Пром. энергетика / М.Г. Зиганшин, А.В. Дмитриев. – 2009. – №3. – С. 51-56
- 227 Зиганшин, М.Г. Расчетные параметры осаждения взвеси в аппаратах с вращательным движением мультифазных потоков. Часть 2. Критерии эффективности циклонной сепарации // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета/ М.Г. Зиганшин, А.М. Зиганшин, Р.М. Гильфанов. – 2010. – № 2(14). – С. 161-167
- 228 Зиганшин, М.Г. Теоретические основы пылегазоочистки: Уч. пособие/М.Г. Зиганшин. – Казань: Изд. КГАСУ, 2005. – 262 с.
- 229 Хамидуллин, Р.Н. Технология очистки газовых выбросов от пыли производства силикатного кирпича. Дисс....к.т.н. – Казань: КГТУ, 2005.
- 230 В.Е. Launder, D.B. Spalding/ The numerical computation of turbulent flows// *Comp. Meth. in Appl. Mech. & Eng.*, Vol. 3, p.269, 1974
- 231 Диаров, Р.К., Овчинников, А.А., Николаев, Н.А. Вихревые газожидкостные сепараторы. Обз. инф., сер. «Машины и нефтяное оборудование»/ Р.К. Диаров, А.А. Овчинников, Н.А.Николаев. – М.: ВНИИОЭНГ, 1984. – 44с.
- 232 Дмитриев, А.В. Сравнительные характеристики эффективности конструкций сепараторов дисперсных потоков//Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета/ А.В. Дмитриев,. М.Г. Зиганшин. – 2008. – № 2(10). – С. 100-103
- 233 Овчинников, А.А. Динамика двухфазных закрученных турбулентных течений в вихревых сепараторах./ А.А. Овчинников. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2005. – 288с.
- 234 Голягин, А.В. Исследование гидродинамических характеристик вихревого аппарата// Электронный научный журнал «Исследовано в России» [электронный ресурс] / А.В. Голягин, Р.А. Халитов, А.Ф. Махоткин. – 2006. – С. 1622-1630. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/174.pdf>
- 235 Зиганшин, М.Г. Моделирование инерционного захвата взвешенных в потоке твердых частиц волокнами малого диаметра //Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21: Сб. трудов XXI Международн. науч. конф.: в 10 т. Т. 3/ Под общ. ред. В.С. Балакирева. / М.Г. Зиганшин, А.М. Зиганшин. – Саратов, Саратовский гос. техн. ун-т, 27-31 мая 2008 г. – С. 165-168 (2008)
- 236 Еремкин, А.И. Моделирование инерционного захвата частиц при фильтрации дисперсного потока // Региональная архитектура и строительство/ А.И. Еремкин, А.Н. Кошев, М.Г. Зиганшин, А.М. Зиганшин. – 2008. - №1 (4). – С. 28-34
- 237 Альбом течений жидкости и газа / Сост. М. Ван-Дайк. – М.: Мир, 1986. – 184 с.
- 238 Зиганшин, М.Г. Сравнение результатов численного и натурного моделирования обтекания потоком цилиндра малого диаметра. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22: Сб. трудов XXII Международн. науч. конф.: в 10 т. Т. 9/ Под общ. ред. В.С. Балакирева. – Псков, Псковский гос. политехн. ин-т, 25-30 мая 2009 г. / М.Г. Зиганшин, А.М. Зиганшин. – С. 164-167 (2009)
- 239 Зиганшин, М.Г. Полуэмпирическая модель образования автослоя на тканых фильтрационных материалах. Часть 1. Исследование взаимодействия взвешенных частиц и

- препятствия в потоке// Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета/ М.Г. Зиганшин, А.М. Зиганшин. – 2009 –№1(11) – С. 212 - 216.
- 240 Чжен, П. К. Отрывные течения: т. 1 / П. К. Чжен. – М.: Мир, 1972. – 299 с.
- 241 Зиганшин, М. Г. Эффективность очистки газовых выбросов парогенераторов ТЭС в аппаратах вихревого типа / М.Г. Зиганшин, П.В. Ежов, А.В. Дмитриев // Промышленная энергетика. – 2008. – №9. – С. 49-54.
- 242 Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520с.
- 243 Эберт К., Эдерер Х. Компьютеры. Применение в химии: Пер. с нем. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
- 244 Дмитриев, А.В. Взаимодействия при касании препятствия взвешенной в потоке частицей //Проблемы энергетики/ А.В. Дмитриев, М. Г. Зиганшин/ – 2008. – № 3-4. – С. 58 - 63.
- 245 Степанов Н.Ф. Квантовая механика и квантовая химия. – М.: Мир, 2001. – 519 с.
- 246 Химия: Справ. материалы/Третьяков Ю.Д., Олейников Н.Н., Кеслер Я.А. и др.; Под ред. Третьякова Ю.Д. – М.: Просвещение, 1993. – 287 с.
- 247 Миргалиева, О.С. Моделирование фильтрации двухфазного аэрозоля с золой энергетических углей и способы учета электростатических сил//Известия КГАСУ/О.С. Миргалиева, М.Г. Зиганшин. – 2013. – №3(25). – С. 73-79
- 248 Mutsers. S.M.P. – PhD Tes.. Eindhoven University. 1977 (по: Ейтс Дж. Основы механики псевдооживления с приложениями. – М.: Мир, 1986. – 288 с.)
- 249 Берлянд, М.Е. К теории турбулентной диффузии. / М.Е. Берлянд. – Тр. ГГО, вып. 138, с.31-37 (1963)
- 250 Берлянд, М.Е. Об опасных условиях загрязнения атмосферы промышленными выбросами. / М.Е. Берлянд. – Тр. ГГО, вып. 185, с.15-25 (1966)
- 251 Берлянд, М.Е. Исследование атмосферной диффузии и загрязнение атмосферы на современном этапе//Итоги науки: Метеорология и климатология, т.2/ М.Е. Берлянд.– М.: ВИНТИ, 1974. – с. 250-350
- 252 Берлянд, М.Е. Атмосферная диффузия и структура воздушного потока над неоднородной подстилающей поверхностью//Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы./ М.Е. Берлянд, Е.Л. Генихович. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – с. 49-69
- 253 Берлянд, М.Е. О влиянии рельефа на распространение примесей с учетом их начального подъема./ М.Е. Берлянд, В.Б. Киселев. Метеорология и гидрология, №3, с.3-10 (1972)
- 254 Берлянд, М.Е. Распространение в атмосфере промышленных выбросов влаги и их влияние на рассеивание примесей./ М.Е. Берлянд, В.Б. Киселев. Метеорология и гидрология, №4, с.3-15 (1975)
- 255 Берлянд, М.Е. Физические основы расчета рассеивания в атмосфере промышленных выбросов./ М.Е. Берлянд, Р.И. Оникул.– Тр. ГГО, вып. 254, с.3-27 (1971)
- 256 Берлянд, М.Е. Защита воздушной среды от загрязнения и исследование атмосферных примесей./ М.Е. Берлянд, Е.С. Селезнева.– Тр. ГГО, вып. 344, с.209-231 (1974)
- 257 Берлянд, М.Е. Об атмосферной диффузии примесей при штиле./ М.Е. Берлянд, О.И. Куренбин.– Тр. ГГО, вып. 238, с.3-13 (1969)
- 258 Берлянд, М.Е. Города и климат планеты./ М.Е. Берлянд, К.Я. Кондратьев. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. –40с.
- 259 Еремкин, А.И., Эффективная высота неизотермического выброса при поперечном обдувании источника//Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева / А.И. Еремкин, М. Г. Зиганшин, А.М. Зиганшин. – 2008. – №1 (49). – С.53-56
- 260 Зиганшин, М.Г. Моделирование распространения вертикальной неизотермической струи в сносимом потоке//Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21: Сб. трудов XXI Международн. науч. конф.: в 10 т. Т. 3./ Под общ. ред. В.С. Балакирева. / М.Г. Зиганшин, А.М. Зиганшин. - Саратов, Саратовский гос. техн. ун-т, 27-31 мая 2008 г. – С. 234-238

- 261 Монтгомери, Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери. : пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.
- 262 А. Гордон, Р. Форд. Спутник химика/ А. Гордон, Р. Форд: пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 541 с.
- 263 Зиганшин, М.Г. Определение характеристик фонтанирования полидисперсного материала/ Разработка энергосберегающих инженерных систем отопления и газоочистки. // Исследование возможностей улучшения характеристик элементов систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, пыле-и газоочистки. : ОТЧЕТ НИР (промежуточный). ВНИИцентр: N гос регистрации 01960009936./ М.А.Валиуллин, М.Г. Зиганшин, А.И. Нарбеков и др. – Казань: КГАСА, 1997. – с. 32-36
- 264 Мизонов, В.Е. Стохастическая модель равновесной классификации порошков. Теоретические основы хим. технологии, 1984, 18, №6, с. 811-815
- 265 Огурцов, В.А., Егоров, А.Д. Метод расчета процесса классификации сыпучих материалов на виброгрохотах. – Иваново, Ивановский химико-технологический институт, ,1987, с. 93-96
- 266 Ахмадиев, Ф.Г. Математическое моделирование процессов переработки гетерогенных систем и их оптимальное аппаратное оформление/ Системный анализ технологических процессов и их оптимальное проектирование: Отчет НИР (промежуточный). ВНИИцентр: N гос.регистрации 01960007030/ Ф.Г. Ахмадиев и др. – Казань: КГАСА, 1997. – С.40-43
- 267 Beeckmans I., Jutan F.// Can.I.Chem. End-1989, v.67, № 2, p.329-336.
- 268 . Rosato A., Pring F., Standburg K., Swendsen R., Monte Carlo simulation of particulate matter segregation // Power Technol.-1986, v.49, № 1, p. 59-69.
- 269 Зиганшин, М.Г. Исследование режимных характеристик обработки отбросных газов в контактном аппарате / Разработка конструкций и методов расчета элементов систем отопления, вентиляции, утилизации отходов: Отчет НИР (промежуточный): № Гос. регистрации 01860050341. / М.А.Валиуллин, В.Н.Волков, М.Г. Зиганшин, А.И. Нарбеков и др. – Казань: КИСИ, 1993. – с. 29-35
- 270 Эйтс, Дж. Основы механики псевдооживления с приложениями. – М.: Мир, 1986. – 288 с.
- 271 Посохин, В.Н., Зиганшин, М.Г. Лабораторный практикум по процессам и аппаратам газоочистки: Уч. пособие/ В.Н. Посохин, М.Г. Зиганшин. – Казань: КГАСА, 1995. – 63с.
- 272 Зиганшин, М.Г. Сжигание отбросных паров и газов лакокрасочного производства в пламени природного газа. Автореф...канд. дисс. Л.:ЛИСИ, 1976
- 273 Зиганшин, М.Г. Термообработка вентиляционных и технологических выбросов с органическими загрязнителями// Журнал экологии и промышленной безопасности/ М. Г. Зиганшин. – 2007. – № 5(35) – С. 68-70.
- 274 Патент РФ 2021558, МПК 5F23D 14/00, 1994.
- 275 А.с. СССР 1599620, МПК 5F23D 14/70, 1990.
- 276 Зиганшин, М.Г., Кривоногов, Б.М. Результаты стендовых испытаний горелочных устройств со стабилизацией для установок термоокислительного обезвреживания отбросных газов./ Термическая и каталитическая очистка газовых выбросов в атмосферу: Сб. науч. тр. АН УССР / М.Г. Зиганшин, Б.М. Кривоногов. – Киев: Наук. думка, 1984. - с.129-133.
- 277 Кривоногов, Б. М., Зиганшин, М. Г. Исследование сжигания отбросных газов лакокрасочного производства при их отдельном и совместном вводе с топливом // Повышение качества сжигания топлива и охрана воздушного бассейна от загрязнения вредными выбросами ТЭС / Б. М. Кривоногов, М. Г. Зиганшин. – Л.: НТОЭиЭП, 1977. – с. 48-52
- 278 Зиганшин, М.Г. Термическое обезвреживание токсичных атмосферных выбросов, с утилизацией тепла продуктов сорания//Теплообмен в отопительно-вентиляционных устройствах: Межвуз. сб./ М. Г. Зиганшин. – Казань, КХТИ, 1987. – С.67-71.
- 279 Равич, М.Б. Газ и его применение в народном хозяйстве./ М.Б. Равич — М.: Наука, 1974. — 368 с.

- 280 Зиганшин, М.Г. Полуэмпирическая модель образования автослоя на тканых фильтрационных материалах. Часть 2. Опытное исследование фильтрации// Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета/ М.Г. Зиганшин, А.М. Зиганшин. – 2009 –№ 1(11) – С. 217 - 221.
- 281 Сахарнов А.В., Зега И.П. Очистка сточных вод и газовых выбросов в лакокрасочной промышленности. — М.: Химия, 1979. — 184 с.
- 282 Эльтерман В.М. Охрана воздушной среды на химических и нефтехимических предприятиях . — М.: Химия, 1985. — 160 с.
- 283 Быстров ГА., Гальперин В.М., Титов Б.П. Обезвреживание и утилизация отходов в производстве пластмасс. — Л.: Химия, 1982. — 264 с.
- 284 Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. — М.: Химия, 1972. — 248 с.
- 285 Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. изд.: В 2-х ч. Ч. 2/ Под ред. Калверта С., Инглунда Г.М. — М.: Металлургия, 1988.- 712 с.
- 286 Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. — М.: Химия, 1981. — 392с.
- 287 Бакластов А.М., Горбенко В.В., Удыма П.Г. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассообменных установок. — М.: Энергоиздат, 1981. — 336 с.
- 288 Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. — М.: Химия, 1973. — 750 с.
- 289 Перри Дж. Справочник инженера-химика: т. II - Л.: Химия, 1969. — 504 с.
- 290 Расчеты химико-технологических процессов/ Под ред. Мухленова И.П. — Л.: Химия, 1982. — 248 с
- 291 Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки: Справочник/Под ред. Судакова Е.Н. — М.: Химия, 1979. — 568 с.
- 292 Контроль за выбросами в атмосферу и работой газоочистных установок на предприятиях машиностроения. Практическое руководство. — М.: Машиностроение, 1984. — 128 с.
- 293 Под ред. Л.В. Вершкова, В.Л. Грошева, В.В. Гаврилова, Н.Н. Бурцевой. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба, утв. 9.03.99г. -М: Госкомитет РФ по охране окружающей среды, 2006. – 102 с.
- 294 Порядок определения платы и ее предельных размеров за загрязнение окружающей природной среды, размещение отходов, другие виды вредного воздействия (с изм. от 14 июня 2001 г.) .Утв. [постановлением](#) Правительства РФ от 28 августа 1992 г. N 632. (<http://zakon.kuban.ru/nd2/2001-4/632pp-92p.shtml>)
- 295 Базовые нормативы платы за выбросы, сбросы загрязняющих веществ в окружающую природную среду и размещение отходов (утв. Минприроды РФ 27.11.1992) (ред. от 18.08.1993)// "Закон", N 3, 1993.
- 296 Постановление Правительства РФ от 12.06.2003 N 344 (ред. от 08.01.2009) «О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, размещение отходов производства и потребления»
- 297 [Федеральный закон от 3 декабря 2012 г. N 216-ФЗ "О федеральном бюджете на 2013 год и на плановый период 2014 и 2015 годов"](#)
- 298 Зиганшин, М.Г. Система термообезвреживания отбросных газов, содержащих пары хлорсодержащих растворителей.// Всесоюзная научно-практическая конференция «Человек-труд-экология»: Тезисы докладов / М.Г. Зиганшин – Волгоград: ВолгИСИ, 1990. – с.94-95.
- 299 Циклон-фильтр/Зиганшин, М.Г., Алещенко И.С., Павлов Л.В., Зиганшин А.М./ Патент РФ на изобретение №2361678, опубл.:20.07.2009 Бюл. № 20.

- 300 Зиганшин, М.Г. Аппараты и режимы комплексной обработки выбросов с галогенсодержащими загрязнителями // Химическое и нефтегазовое машиностроение / М.Г. Зиганшин, А.М.Зиганшин, А.В.Дмитриев. – 2009. – № 4. – С. 34-37
- 301 Зиганшин, М.Г. Исследование процесса обезвреживания отбросных газов, содержащих хлорсодержащие компоненты.// Сборник докладов Республиканского научно-технического семинара «Мониторинг окружающей среды»./ М.Г.Зиганшин. – Казань, КИСИ, 1993 – С.28-29
- 302 Адельшин, А.Б. Комплексная обработка вентиляционных и технологических выбросов с хлорсодержащими загрязнителями// Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета/ А.Б. Адельшин, М.Г. Зиганшин. – 2007. – № 2(8). – С. 107-111.
- 303 Зиганшин, М.Г. Комплексное обезвреживание галогенорганических атмосферных выбросов.// Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан: Материалы I Республиканской научной конференции./ М.Г. Зиганшин. – Казань, АН Татарстана, 1993. – с.84-85.
- 304 Зиганшин, М.Г. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Газоснабжение»/ М.Г. Зиганшин, А.М. Мусаев, Ю.Х. Хабибуллин. – Казань, КГАСА, 2004. – 38с.
- 305 Перегуд, Е.А. Химический анализ воздуха. – Л.:Химия, 1976. – 328с.
- 306 Опаловский, А.А. Гексафторид серы //Усп. химии/ А.А. Опаловский, Е.У. Лобков. – 1975. – т. XLIV. – вып. 2. – С. 193 – 213.
- 307 Патент РФ № 2170699. Способ очистки гексафторида серы. Абрамов О.Б., Арасланов Г.Г., Выражейкин Е.С., Голубев А.Н., Дедов А.С., Захаров В.Ю., Калашникова Н.А., Масляков А.И., Насонов Ю.Б., Шабалин Д.А. Патентообладатель: ОАО "Кирово-Чепецкий химический комбинат им. Б.П. Константинова". Подача заявки 24.08.1999, начало действия патента 4.08.1999, публикация патента 20.07.2001.
- 308 V.C. Papadimitriou, R.W. Portmann, D.W. Fahey, J. Mühle, R.F. Weiss, and J.B. Burkholder. An Experimental and Theoretical Study of the Atmospheric Chemistry and Global Warming Potential of SO₂F₂. J.Phys.Chem. A, 2008, 112 (49), p. 12657-12666.
- 309 Совместная утилизация выбросов хладона-23 и гексафторида серы на предприятии ООО «Завод полимеров КЧХК»/ Проектная документация (перевод): Документ проекта совместного осуществления// Версия 1.1: 22.07.2008. – Кирово-Чепецк, 2009. – 49 с.
- 310 Галкин, Н.П. Реакционная способность и термическая устойчивость гексафторидов // Усп. химии / Н.П. Галкин, Ю.Н. Туманов. – 1971. – т. XL. – вып. 2. – С. 276 – 294.
- 311 Зиганшин, М.Г. Системы очистки выбросов ТЭС: ч.2. Оценки эффективности, верификация критериев оценки: Монография/ М.Г. Зиганшин.– Казань: Изд. КГЭУ, 2013. – 212 с.
- 312 Совместная утилизация выбросов хладона-23 и гексафторида серы на предприятии ООО «Завод полимеров КЧХК»/ Проектная документация (перевод): Документ проекта совместного осуществления// Версия 1.1: 22.07.2008. – Кирово-Чепецк, 2009. – 49 с.
- 313 Зиганшин, М.Г. Совместное обезвреживание шламов и загрязненного воздуха в топках печей.// Тезисы XXXI Республиканской научной конференции/ М. Г. Зиганшин. – Казань: КИСИ, 1978. – с. 43.
- 314 Зиганшин, М.Г. Термическое обезвреживание токсичных атмосферных выбросов с утилизацией тепла продуктов сгорания//Тепломассообмен в отопительно-вентиляционных устройствах: Межвуз. сб./ М.Г. Зиганшин. - Казань, КХТИ, 1987. – с. 67-71.
- 315 Зиганшин, М.Г. Исследование работы горелки с высокими избытками воздуха// Тезисы XXXII Республиканской научной конференции/ М. Г. Зиганшин. – Казань: КИСИ, 1978. – с. 51.
- 316 Зиганшин, М.Г. Сжигание отбросных газов лакокрасочного производства в пламени природного газа.// Опыт рационального использования крупными промышленными предприятиями и тепловыми электростанциями топливно-энергетических ресурсов и

- сокращения их вредных выбросов в атмосферу./ М.Г. Зиганшин, Б. М. Кривоногов, А.И. Авласевич. – Л.: НТОЭиЭП, 1982. – с. 65-66.
- 317 Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ "Об охране окружающей среды"(ред. от 26.06.2007). "Собрание законодательства РФ", 14.01.2002, N 2, ст. 133, с изм., внесенными Федеральным законом от 26.06.2007 N 118-ФЗ, (опубл. в "Собрании законодательства РФ" 02.07.2007).
- 318 Еремкин А.И. Комплексные показатели совершенства очистки воздуха и производственных выбросов при наличии «парниковых» газов/ /Materialy IV mezinarodni vedecko-prakticka conference "Veda a technologie: krok do budoucnosti – 2008". 1 – 15 brezen 2008 roku. Díl. 12/ Matematika. Fyzika. Moderni informacni technologie. Vystavba a architektura: Praha. Publishing Hous "Education and Science" s.r.o/ А.И. Еремкин, М.Г. Зиганшин, А.В. Дмитриев. – Praha, Česká. – S. 84-86 (2008)
- 319 Богуславский, Л.Д. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: Справ. пособие. / Л.Д. Богуславский, В.И. Ливчак, В.П. Титов и др.; Под ред. Л.Д. Богуславского и В.И. Ливчака. – М.: Стройиздат, 1990. – 624 с.
- 320 Чичирова, Н.Д. Оценки эффективности теплоэнергетических объектов: Часть 2. Показатели эффективности при выбросе нескольких видов парниковых газов //Надежность и безопасность энергетики/Н.Д. Чичирова, М.Г. Зиганшин. – 2013. – № 4 (23). – С. 39-43.
- 321 Система одобрения для проектов совместного осуществления в рамках Киотского протокола в России – критерии и организация. – М.: ГУИЭС, 2001. – 56 с.
- 322 Основы управления рисками в теплоснабжении. Отчет T26/2001 Electrowatt-Ekono OY, ссылка 60D02615-Q070-005, папка Sky 6/9:p – Suomen Kaukolämpö ry, 2001. 63 с.
- 323 Зиганшин, М.Г. О концепциях инженерного экологического образования//Образование в области окружающей среды: Тезисы докл. III Всесоюзной конф./ М.Г. Зиганшин. – Казань, КГУ, 1990. – с.16-18
- 324 Зиганшин, М.Г. Лабораторно-практический курс пылегазоочистки: Часть 2. Практический курс// Методическое пособие и указания по учебной и исследовательской работе для студентов направлений 270800 «Строительство» и 280700 «Техносферная безопасность» (квалификация бакалавр и магистр)/ М.Г. Зиганшин, А. М. Зиганшин. – Казань: КГАСУ, 2013.– 206 с.