

Приложение П1

Использование безразмерного комплекса Re_r для прямоточно-вихревого сепаратора (ПВС) с тангенциальным вводом

При сепарации твердых частиц из газового потока необходимости учета выталкивающего действия газа на взвесь не возникает – плотности ингредиентов различаются на три порядка. Далее рассмотрена задача выделения взвеси в такой вращающейся системе, где плотности и другие инерционные свойства взвешенных частиц и несущего потока сопоставимы. Для верификации критериального параметра сепарации использованы экспериментальные данные по работе прямоточно-вихревого сепаратора (ПВС) с тангенциальным вводом загрязненных нефтепродуктами стоков ([А.А. Овчинников и др., 2006]). В этом случае архимедовы силы становятся существенными и должны учитываться в безразмерных параметрах частиц (капель нефтепродуктов) – инерционной характеристике частиц Re_p^{in} и конечном параметре Re_r эффективности отделения взвеси. В то же время параметр интенсивности крутки потока в аппарате останется неизменным, если в задаче можно пренебречь влиянием на изменение плотности потока силы тяжести, изменения температуры и наличия примеси, что следует из уравнения движения:

$$\rho_L du/d\tau = \rho_{0L}(1 - \beta\vartheta)g - \nabla p + \eta \nabla^2 u, \quad (1)$$

где u – скорость потока (далее – ее тангенциальная компонента), м/с; τ – время, с; p – давление, Па; g – ускорение силы тяжести, м/с²; ρ_L , ρ_{0L} – текущая и начальная плотность жидкости, кг/м³ ($\rho_L = \rho_{0L}(1 - \beta\vartheta)$); β , ϑ – температурный коэффициент объемного расширения и относительное изменение температуры жидкости; η – динамический коэффициент вязкости потока, Па·с.

На математическое описание радиального распределения скоростей в поперечном сечении аппарата существенно влияет выбор модели движения потока. Тип модели вращательного движения системы «вода – диспергированная жидкая нерастворимая фаза меньшей плотности» в ПВС (рис. 1) определен в работе А.А. Овчинникова и др., (2006)¹ при значениях параметра крутки $K > 1$ как квазитвердое, т.е. вращение с постоянной угловой скоростью $u/R = \omega = \text{const}$, с⁻¹. Параметр K здесь рассчитывается как отношение максимальной тангенциальной компоненты u_{max} к осевой компоненте v скорости вращающегося потока. Авторами работы [А.А. Овчинников и др., 2006] опытным путем установлено, что v в рассматриваемом аппарате имеет распределение, близкое к равномерному, и приближенно равна начальной (среднерасходной) скорости u_0 . Это позволяет, также приближенно, до существенного разделения компонентов, рассматривать трехмерное винтовое движение потока вдоль аппарата как плоское вращение в его поперечном сечении.

¹ Овчинников А.А., Шадрин А.А., Алексеев Д.В., Николаев Н.А. Моделирование процесса очистки стоков промышленных предприятий от нерастворимых жидких взвесей в прямоточно-вихревых сепараторах. // Химическая промышленность сегодня, 2006, №3. С. 52 – 56.

Конкретная форма описания распределения тангенциальных скоростей u включает конструктивные размеры сечения аппарата, к которому привязывается скорость u_0 , м/с, поступающего потока. При произвольных размерах $b \times c$, м, входного сечения 1-1 расход

$$V = b c u_0, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2)$$

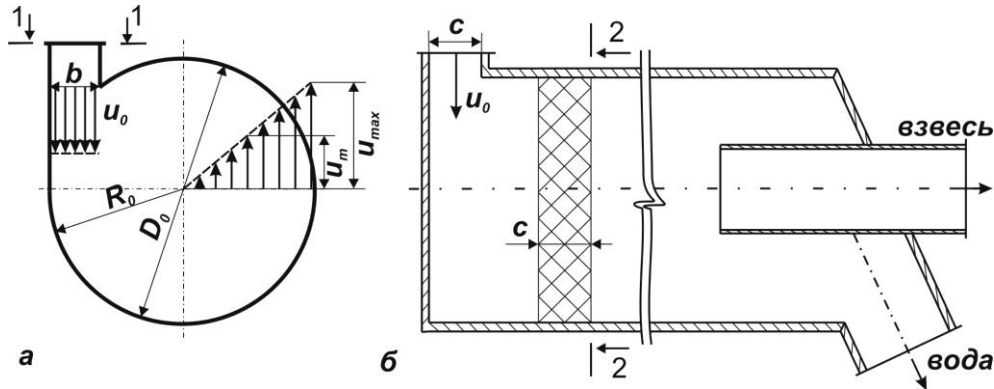


Рис.1 Движение потока в (ПВС) с тангенциальным завихрителем (ТЗ): *а* – модель «квазитвердого» вращения; *б* – расчетная схема ПВС

Рассмотрим поперечное сечение ПВС 2-2 (рис. 1б) толщиной c на некотором расстоянии от входа с развитым вращающимся относительно оси потоком. Квазитвердому вращению соответствует линейная зависимость тангенциальных скоростей от расстояния до оси аппарата $u = \omega R$. На оси $u_{min} = 0$, у стенки корпуса $u_{max} = \omega R_0$, и средняя скорость $u_m = u_{max}/2 = \omega R_0/2$ м/с. Тогда в выделенном сечении 2-2 расход потока жидкости, проходящего через радиальные площадки размером $R_0 \times c$, м, определится как

$$V = c R_0 u_m = c R_0^2 \omega / 2, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) найдем выражение для параметра, определяющего формирование потока в аппарате – угловой скорости

$$\omega = 2 u_0 b / R_0^2 = B / \tau_0 \text{ с}^{-1},$$

и радиальное распределение тангенциальной скорости

$$u = \omega R = 2 u_0 b R / R_0^2 = (B / \tau_0) R \text{ м/с}, \quad (4)$$

где $B = 2b/R_0$ – безразмерный симплекс, характеризующий геометрию входа потока в аппарат; $\tau_0 = R_0/u_0$ – временной масштаб для потока в аппарате, с.

В рассматриваемой задаче можно пренебречь влиянием сил трения (модель вращения – квазитвердая) и тяжести (перепад гидростатического давления от его высшей и низшей точек до уровня оси не превышает нескольких процентов) на распределение давлений в поперечном сечении аппарата. Это позволяет представить радиальный градиент давления в аппарате $\text{grad } p$ следующим образом:

$$\text{grad } p = \frac{\partial p}{\partial R} = \frac{\partial F}{\partial S \partial R} = \frac{\partial m}{\partial v} \frac{\partial u}{\partial \tau} = \rho_L \frac{\partial u}{\partial \tau} \text{ Па/м.} \quad (5)$$

С учетом принятых упрощений $\partial u / \partial \tau \approx u^2 / R$, и

$$dp = \rho_L u^2 dR / R, \text{ Па.} \quad (6)$$

Преобразуем (6), используя (4):

$$dp = \rho_L (B / \tau_0)^2 R dR, \text{ Па.} \quad (7)$$

Группа постоянных величин в (7) содержит характерный параметр вращающегося в ПВС потока – начальный радиальный градиент силы f_R :

$$f_R = \rho_L u_0^2 B^2 R_0, \text{ Па} \cdot \text{м.} \quad (8)$$

Для каждого типа и типоразмера аппарата он имеет строго определенную величину, т.е. численно характеризует конструктивные параметры аппарата. Так как f_R служит и характеристикой потока, он используется для отбора из безразмерных комплексов, получаемых далее методами теории подобия, обобщенных характеристик энергетической эффективности вихревых устройств.

Определим параметр $a = f_R / u_0 = \rho_L u_0 B^2 R_0$, Па·с, как удельную (на единицу объема потока) затрату энергии при создании вихревого движения потока с заданной начальной скоростью u_0 в ПВС с тангенциальным завихрителем (ТЗ). Характеристика a представляет собой действие, совершаемое над единицей объема сбросов, обрабатываемых в аппарате, в смысле интеграла функции Лагранжа L – это полная энергия движущегося потока за промежуток времени Δt от начального до конечного момента движения частицы вместе с потоком в аппарате. В рассматриваемом стационарном процессе удельное действие a представлено произведением удельной начальной кинетической энергии $\rho_L u_0^2 / 2$ на характерное для конструкции аппарата время $2B^2 \tau_0$. Отношение a к естественному масштабу удельного действия потока – динамическому коэффициенту вязкости η , приводит к безразмерному параметру, отличающемуся от критерия Рейнольдса специфичным для конструкции сепаратора с ТЗ симплексом B . Обозначив этот параметр Re_v , получим:

$$Re_v = a / \eta = \rho_L u_0 R_0 B^2 / \eta. \quad (9)$$

В Re_v входят характеристики потока и ПВС с ТЗ, что позволяет рассматривать его как безразмерную характеристику энергетического совершенства обработки потока в вихревом аппарате с конкретными размерами и параметрами потока.

Параметр Re_v можно получить и посредством приведения к безразмерному виду дифференциального уравнения (1). Введем в него некоторые упрощения. При условии стационарности течения $\partial u / \partial \tau = \text{const}$, и $du/d\tau = u du / \partial R$. Для плоского вращения можно принять $\nabla^2 u \cong \partial^2 u / \partial R^2$, а также считать, что в пределах рассматриваемого сечения 2-2 в потоке существует только радиальный градиент давления, т.е. определить $\nabla p \equiv \text{grad } p = \partial p / \partial R$. С учетом упрощений и (7) представим (1) в виде:

$$\rho_L du/d\tau = \eta \nabla^2 u - \rho_L (B/\tau_0)^2 R. \quad (10)$$

Отнесем переменные R , u к линейному и скоростному масштабам – радиусу R_0 , м и начальной скорости u_0 , м/с: $R = R/R_0$; $U = u/u_0$; теперь приведем (10) к безразмерному виду:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_L u_0^2}{R_0} \frac{U \partial U}{\partial R} &= \eta \frac{u_0}{R_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} - \frac{\rho_L u_0^2 B^2}{R_0} R; \\ \frac{u_0 R_0 \rho_L}{\eta} \frac{U \partial U}{\partial R} &= \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} - \frac{\rho_L u_0 R_0 B^2}{\eta} R; \quad Re \frac{U \partial U}{\partial R} = \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} - Re_v R, \text{ и окончательно} \\ Re_v \left(\frac{1}{B^2} \frac{U \partial U}{\partial R} + R \right) &= \frac{\partial^2 U}{\partial R^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Параметр эффективности отделения взвеси может быть найден из сопоставления Re_v с аналогичной безразмерной энергетической характеристикой капли, перемещающейся в потоке. Радиальный градиент силы f_{Rdr} , действующей на сферические капли диаметром D_{dr} и плотностью ρ_{dr} , при условии постоянства градиента силы инерции F_1 в тангенциальном направлении, определится как

$$f_{Rdr} = dF_1/dR = F_1/R_0 = \frac{(m_{dr} - m_L) du}{R_0 d\tau} = \frac{\pi(\rho_{dr} - \rho_L) D_{dr}^3 u^2}{6 R_0 R} \text{ Па}\cdot\text{м}. \quad (12)$$

Здесь учтена масса m_L измещаемого частицей объема потока, что существенно при обработке жидких сред. Преобразуем (12) с учетом (4): $f_{Rdr} = u \pi (\rho_{dr} - \rho_L) D_{dr}^3 u_0 B / (6 R_0^2)$, и затем получим начальный градиент силы, соответствующий входной скорости $u = u_0$:

$$f_{Rdr} = \pi(\rho_{dr} - \rho_L) D_{dr}^3 u_0^2 B / (6R_0^2).$$

Определим как характерную скорость u_{dr} , с которой капля плотностью ρ_{dr} проходит в потоке плотностью ρ_L расстояние, равное ее диаметру D_{dr} , за время релаксации τ_w :

$$u_{dr} = D_{dr} / \tau_w = 18\eta / [(\rho_{dr} - \rho_L) D_{dr}] \text{ м/с.} \quad (13)$$

Параметр $\tau_w = (\rho_L - \rho_{dr}) D_{dr}^2 / (18\eta)$, с, отражает влияние массы, формы и размеров частицы на изменение ее скорости в потоке с плотностью ρ_L , кг/м³, и вязкостью η , Па·с.

Удельное действие для капли

$$a_{dr} = f_{Rdr} / u_{dr} = 3\pi\eta (u_0 \tau_w / R_0)^2 B, \text{ Па·с.} \quad (14)$$

Отношение a_{dr} к масштабу удельного действия η дает безразмерный параметр действия капли, который можно рассматривать как квадрат инерционного числа Рейнольдса для капли Re_{dr}^{in} :

$$\left(Re_{dr}^{in} \right)^2 = 3\pi (u_0 \tau_w / R_0)^2. \quad (15)$$

Комплекс $\sqrt{3\pi} u_0 \tau_w / R_0 = \sqrt{3\pi} \tau_w / \tau_0 = \sqrt{3\pi} T_w$ имеет структуру критерия Рейнольдса. Он представляет инерционные свойства капли и силу сопротивления, которую она преодолевает, вовлекаясь во вращающийся поток с радиусом кривизны R_0 .

Безразмерной энергетической характеристикой процесса сепарации может служить отношение $\left(Re_{dr}^{in} \right)^2$ к числу Re_v , представляющему действие криволинейного потока. Это соотношение также преобразуется в комплекс со структурой критерия Рейнольдса:

$$\frac{\left(Re_{dr}^{in} \right)^2}{Re_v} = \frac{3\pi (u_0 \tau_w / R_0)^2}{4\rho_L u_0 b^2 / (R_0 \eta)} = \frac{3\pi}{1296} \frac{4u_0 (\rho_L - \rho_{dr})^2 D_{dr}^4}{\rho_L B^2 R_0^3 \eta} = \frac{3\pi}{1296} Re_r \quad (16)$$

Результаты расчетов значений безразмерного параметра Re_r приведены на рис. 2

Дополнительные характеристики исследуемого процесса получим посредством приведения к безразмерному виду уравнения движения частиц в криволинейном потоке под действием сил сопротивления и плавучести.

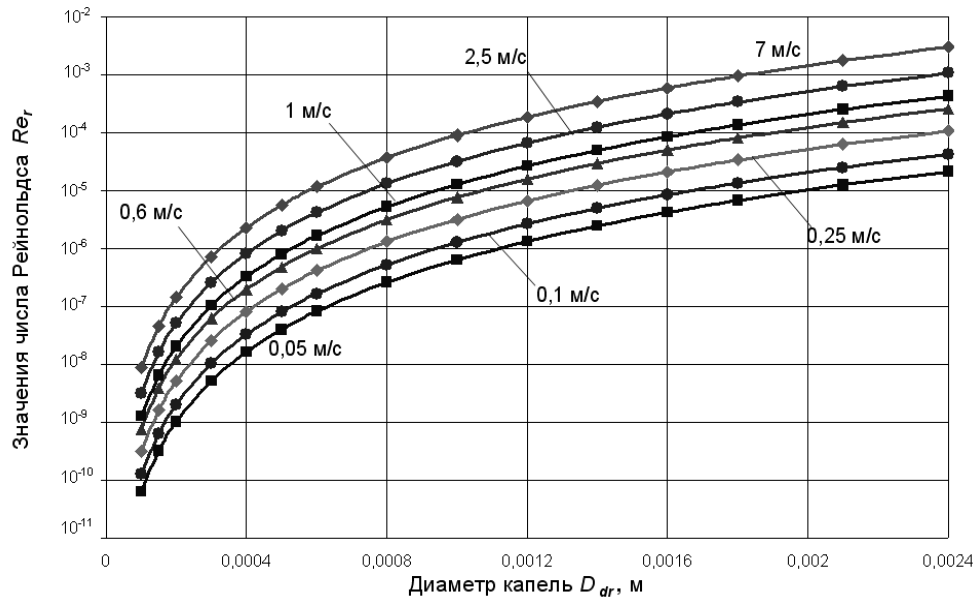


Рис. 2 Зависимость числа Re_r от скорости потока на входе в ПВС и диаметра капель

Без учета взаимодействия частиц взвеси в потоке между собой, влияния броуновского движения молекул потока на частицы, фазовых превращений частиц, различия их размеров и форм, движение взвешенной капли массой m_{dr} , кг со скоростью \vec{w} , м/с можно описать в соответствии с законом Ньютона как

$$(m_L - m_{dr}) d\vec{w} / d\tau = \vec{F}, \quad (17)$$

где \vec{F} – результирующая сила, Н, действующая на движущуюся в потоке частицу.

Сила \vec{F} является равнодействующей множества сил, из которых для данной задачи существенны сила сопротивления \vec{F}_ζ потока, в котором движется частица, и архимедова сила \vec{F}_ρ , возникающая за счет разности плотности потока и частиц:

$$\vec{F}_\zeta = \zeta \rho_L (\vec{u} - \vec{w})^2 S / 2, \text{ Н}, \quad (18)$$

$$\vec{F}_\rho = \pi D_{dr}^3 (\rho_L - \rho_{dr}) \vec{g} / 6, \text{ Н}, \quad (19)$$

где ζ – коэффициент местного сопротивления, S – площадь частицы в сечении, нормальном сечению потока, или миделево сечение частицы, м^2 .

В условиях, когда для силы сопротивления применима формула Стокса $\vec{F}_\zeta = 3\eta\pi D_{dr}(\vec{u}_0 - \vec{w})$, (17) можно представить как:

$$\frac{\pi D_{dr}^3 (\rho_L - \rho_{dr})}{6} \frac{d\vec{w}}{d\tau} = 3\eta\pi D_{dr} (\vec{u}_0 - \vec{w}) + \frac{\pi D_{dr}^3 (\rho_L - \rho_{dr}) \vec{g}}{6}. \quad (20)$$

После деления обеих частей на $3\eta\pi D_{dr}$ уравнение движения приобретает вид:

$$\tau_w d\vec{w}/d\tau + \vec{w} = \tau_w \vec{g} + \vec{u}_0 = \vec{w}_e. \quad (21)$$

Здесь τ_w представляет время, за которое поток вовлекает частицу в совместное движение до полного совпадения ее скорости \vec{w} по модулю и направлению с некоторой конечной скоростью \vec{w}_e , которая является результатом векторного сложения скорости потока \vec{u}_0 и скорости подъема частицы $\tau_w \vec{g}$ за счет плавучести.

Преобразуем (21), используя безразмерное время $T = \tau/\tau_0 = u_0\tau/R_0$ и безразмерную скорость $W = w/u_0$: $(\tau_w u_0 dW/\tau_0 dT) + u_0 W = \tau_w g + u_0$, откуда

$$\frac{dW}{dT} + \frac{R_0}{\tau_w u_0} W = \left(\frac{\tau_w g}{u_0} + 1 \right) \frac{R_0}{\tau_w u_0}, \quad (22)$$

или с учетом (15):

$$\frac{dW}{dT} + \frac{\sqrt{3\pi}}{\text{Re}_{dr}^{in}} W = \left(\frac{\tau_w g}{u_0} + 1 \right) \frac{\sqrt{3\pi}}{\text{Re}_{dr}^{in}}. \quad (23)$$

Система уравнений (23, 11) описывает движение капли плотностью ρ_{dr} в потоке плотностью ρ_L , вращающемся в исследуемом ПВС. Поделим (23) на (11):

$$\left(\frac{dW}{dT} + \frac{\sqrt{3\pi}}{\text{Re}_{dr}^{in}} W \right) / \text{Re}_v \left(\frac{U \partial U}{B^2 \partial R} + R \right) = \left(\frac{\tau_w g}{u_0} + 1 \right) \frac{\sqrt{3\pi}}{\text{Re}_{dr}^{in}} / \frac{\partial^2 U}{\partial R^2}. \quad (24)$$

Безразмерный комплекс в (24) можно представить в виде:

$$\frac{\text{Re}_{dr}^{in}}{\sqrt{3\pi} \text{Re}_v (\tau_w g + u_0)/u_0} = \frac{\sqrt{3\pi} \text{Re}_r}{1296 \text{Re}_{dr}^{in} W_e} = \frac{1}{1296} \frac{\text{Re}_r}{T_w W_e}. \quad (25)$$

где T_w , W_e – безразмерные параметры, характеризующие инерционные свойства системы, время пребывания частицы и ее конечную скорость в конкретном аппарате при совместном действии инерционной и выталкивающей сил.

Результаты расчетов значений безразмерного комплекса

$$\frac{\text{Re}_r}{T_w W_e} = \frac{324 u_0 (\rho_L - \rho_{dr}) D_{dr}^2 \eta}{\rho_L b^2 \left[(\rho_L - \rho_{dr}) D_{dr}^2 g + 18 \eta u_0 \right]}, \quad (26)$$

учитывающего соотношение энергий вихревого потока и взвеси при участии выталкивающей силы для указанных выше условий, представлены на рис. 3, 4 данного приложения.

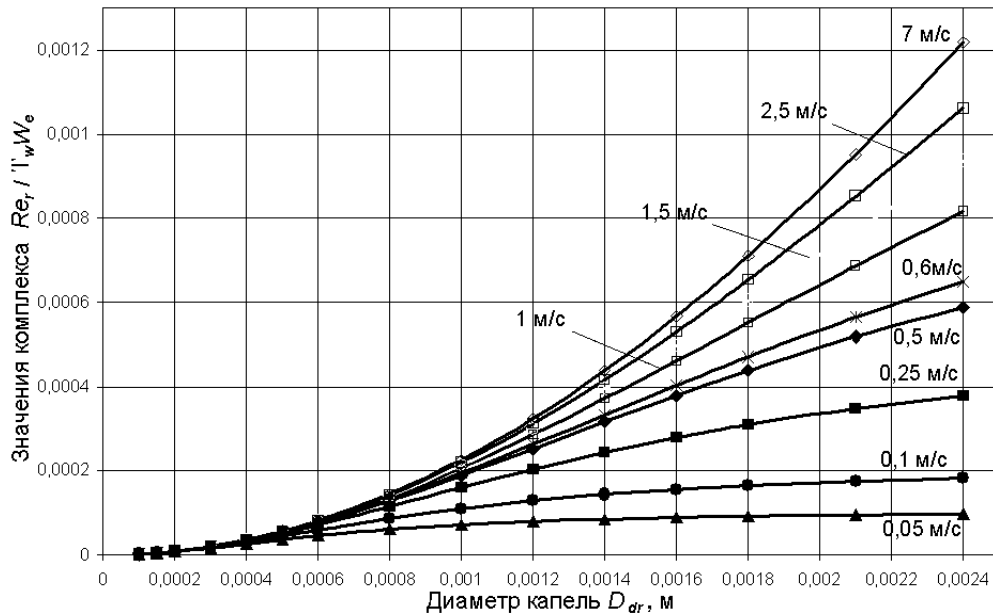


Рис 3 Значения комплекса $Re_r/T_w W_e$ для капель размером $10^{-4} - 10^{-3}$ м. В подписях рядов данных указаны скорости потока на входе в аппарат u_0

Сопоставление значений комплекса $Re_r/T_w W_e$ со степенью отделения капель, взвешенных в жидкой среде большей плотности, проведем по опытной зависимости фракционной эффективности разделения в ПВС системы вода-нефть от относительного диаметра капель $D_{dr}^r = D_{dr}/R_0$ и параметра крутки потока $K = u_{max}/u_0$, приведенной в [А.А. Овчинников и др., 2006].

Согласно с (4), на расстоянии от оси $R = R_0$ тангенциальная скорость $u_{max} = u_0 B$. Следовательно, для рассматриваемого ПВС параметры B и K приблизительно совпадают, и при размерах аппарата $R_0 = 0,2$ м, $b = 0,125$ м $B = 1,25 \approx K$. По [А.А. Овчинников и др., 2006] при $K = 1,25$ на 99% сепарируются капли с относительным размером $D_{dr}^r = 8 \cdot 10^{-3}$, откуда $D_{dr} = 1,6 \cdot 10^{-3}$ м. Расчеты показывают (рис. 3), что для найденного размера капель критическое значение $Re_r/T_w W_e = 4,03 \cdot 10^{-4}$, близкое к аналогичному критическому параметру сепарации взвешенных частиц из газовой среды, соответствует среднерасходной скорости в аппарате 0,6 м/с. Полученное значение входит в диапазон эффективной работы аппарата по скорости потока (0,5...3 м/с), определенный авторами работы на основе опытных данных о дисперсном составе взвеси.

Расчеты с использованием комплекса $Re_r/T_w W_e$ показывают те же скоростные пределы эффективности сепарации и позволяют объяснить их существование. На рис. 4 представлена зависимость комплекса от скорости потока на входе в ПВС для капель размером $10^{-4} \dots 2,1 \cdot 10^{-3}$ м. В диапазоне $10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ м эффективность сепарации заметно повышается до скорости 0,25...0,5 м/с, а далее значение $Re_r/T_w W_e$ остается практически постоянным. Для капель среднего размера – от $5 \cdot 10^{-4}$ м до $12 \cdot 10^{-4}$ м, наблюдается рост $Re_r/T_w W_e$ приблизительно до 4,5

м/с. Более высокая скорость влияет на эффективность сепарации частиц размером свыше $14 \cdot 10^{-4}$ м. При свободной диспергации компактных объектов распределение размеров частиц близко к нормальному или логарифмически нормальному. Поэтому размер большинства частиц, использованных в качестве расчетной основы для работы [А.А. Овчинников и др., 2006], входит в средний диапазон, эффективность сепарации которых заметно растет до скорости 3...4 м/с.

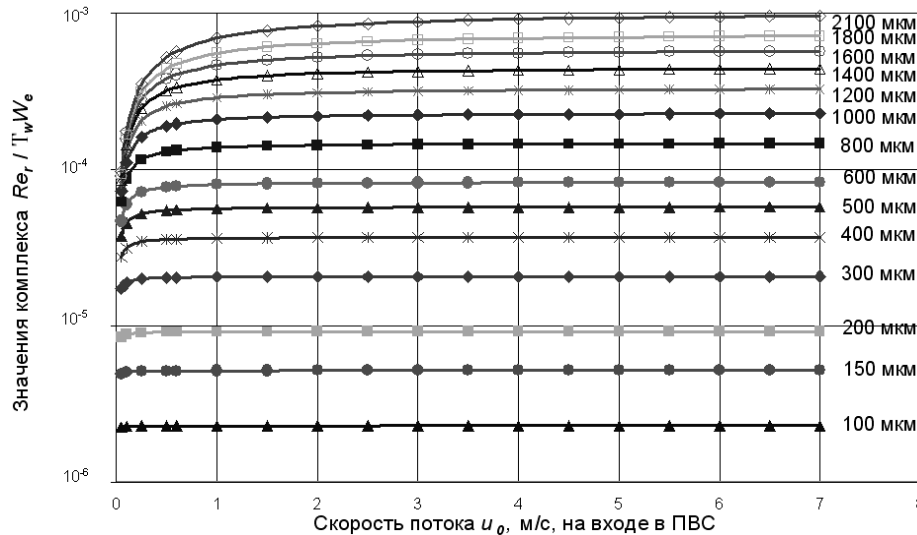


Рис 4 Зависимость комплекса $Re_r/T_w W_e$ от начальной скорости потока в ПВС (В подписях рядов данных указаны диаметры капель D_{dr})

Комплекс $Re_r/T_w W_e$ в целом адекватно характеризует процесс сепарации взвеси в жидкой среде с учетом действия выталкивающих сил. Параметр Re_r может быть использован также и индивидуально при нахождении оптимальных размеров аппаратов. Для оптимизации входного размера сепаратора b воспользуемся выражением (16), заменив R_0 на $D_0/2$ и представив $Re_r = 32u_0(\rho_L - \rho_{dr})^2 D_{dr}^4 / (\rho_L B^2 D_0^3 \eta)$.

Результаты расчетов Re_r в зависимости от входного параметра потока B и диаметра аппарата D_0 для соответствующих 99%-ной сепарации значений $u_0 = 0,6$ м/с и $D_{dr} = 1,6 \cdot 10^{-3}$ м приведены на графике рис. 5. При $B = 1,25$ и $R_0 = 0,2$ м ($D_0 = 0,4$ м) критической величине комплекса $Re_r/T_w W_e = 4,03 \cdot 10^{-4}$ соответствует значение $Re_r = 5,01 \cdot 10^{-5}$. Существенная зависимость Re_r от условий входа потока и поперечного размера аппарата может быть объяснена следующим образом. В соответствии с (4, 8) распределение скорости потока в аппарате полностью определяется входными условиями: $u/u_0 = 2bR/R_0^2$. Это отношение для рассматриваемого ПВС при максимальном R_0 приближенно равно параметру крутки K , определяющему интенсивность вращения потока в аппарате (например, в сечении 2-2 рис.1). Таким образом, K растет пропорционально b и снижается пропорционально R_0 . Поэтому для достижения значения Re_r , соответствующего сепарации взвеси заданного размера, кроме необходимого уровня входной энергии, должны быть обеспечены и определенные входные условия потока, без которых не будет требуемого распределения скорости внутри аппарата.

Так, для обеспечения $Re_r = 5,01 \cdot 10^{-5}$, соответствующего 99%-ной эффективности сепарации капель несмешивающейся жидкости плотностью 798 кг/м^3 в потоке плотностью 998 кг/м^3 и начальной скоростью $0,6 \text{ м/с}$, размер b входного отверстия для сепаратора диаметром D_0 1250 мм не должен превышать 12% радиуса, а для сепаратора диаметром $D_0 = 300 \text{ мм}$ может доходить до 99% радиуса. Для сепараторов большого диаметра влияние входного размера b на эффективность разделения капель можно рассматривать как ограничение их пропускной способности. При одинаковой входной скорости с увеличением диаметра аппарата радиальный градиент тангенциальной скорости и параметр крутки K потока с близким к квазитвердому вращением снижаются. Полученные выражения подтверждают известный факт, что при одинаковом удельном (на единицу площади поперечного сечения) расходе, или одинаковой входной скорости, в сепараторах меньшего диаметра эффективность разделения выше.

Параметр Re_r может быть легко использован для оптимизации конструктивных размеров ПВС. По заданному внутреннему диаметру аппарата D_0 и значению $Re_r = 5,01 \cdot 10^{-5}$ определяется входной параметр ПВС B , и затем подсчитывается его входной размер b . Возможно также решение обратной задачи (проверочный расчет) – нахождение фракционных коэффициентов эффективности отделения примеси при заданном конструктивном параметре аппарата, определяющем радиус кривизны потока.

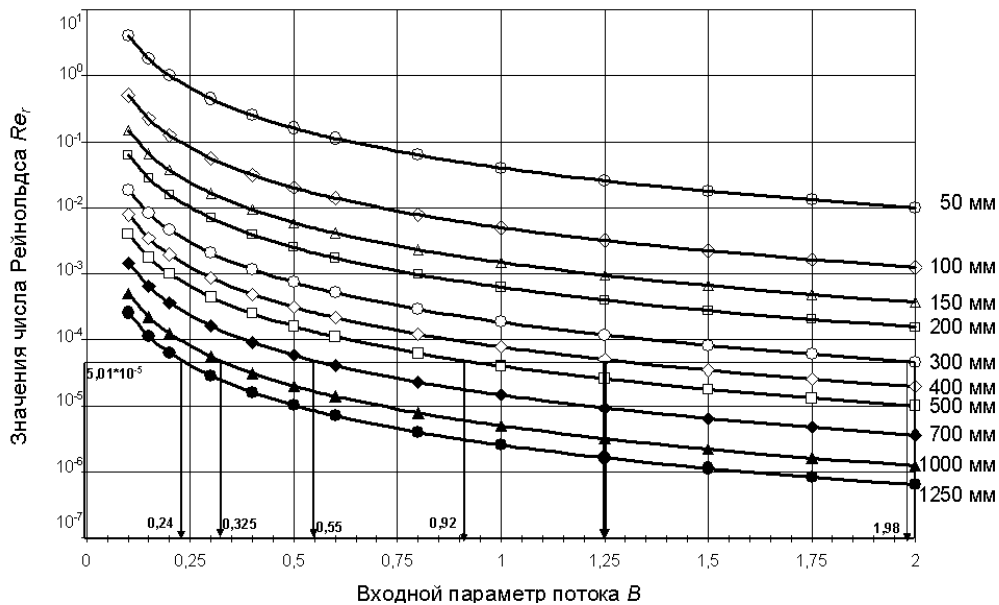


Рис 5 Оптимальные соотношения размеров ПВС для капель диаметром $D_{dr}=1600 \text{ мкм}$, улавливаемых на 99% (в подписях рядов данных указаны величины диаметров аппаратов D_0)

Таким образом, комплекс Re_r может быть применен в проектировании и эксплуатации ПВС для оптимизации размеров аппаратов и режимных параметров с целью обеспечения требуемой эффективности разделения многофазных потоков.

Приложение П2

Решение задачи о нулевых колебаниях гармонических осцилляторов с разложением биномов $(1 \pm \lambda)^{1/2}$ в степенной ряд

Функция $f(x)$ раскладывается в степенной ряд по правилу Тейлора через производные:

$$f(x) = f(a) + \frac{(x-a)f'(a)}{1!} + \frac{(x-a)^2 f''(a)}{2!} + \frac{(x-a)^3 f'''(a)}{3!} + \dots$$

$$\dots + \frac{(x-a)^n f^{(n)}(a)}{n!} + \frac{(x-a)^{n+1} f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}, \quad (1)$$

где a – точка внутри некоторого интервала, в котором $f(x)$ имеет непрерывные производные до $(n+1)$ -го порядка;

ξ – некоторая промежуточная величина между a и x .

Последнее слагаемое обозначают обычно $R_n(x)$ и называют остаточным членом формулы Тейлора. В соответствии с принятой здесь формой написания ряда Тейлора

$$R_n(x) = \frac{(x-a)^{n+1} f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}. \quad (2)$$

Этот остаток свидетельствует о невозможности разложения произвольной функции $f(x)$ по предложенному правилу полностью и нацело.

Известно, что сумма какого-нибудь конечного числа членов разложения n в ряд Тейлора не обязательно будет хорошим приближением функции $f(x)$ (см., например, [5]); поэтому казалось бы, увеличение n должно уменьшать погрешность. Однако при решении данной задачи ошибку, вносимую неточностью математического выражения, следовало бы отнести к неустранимой погрешности. Надо полагать, что объективно (в философском смысле) существует возможность точного и полного разложения в ряд какой бы то ни было функции. Однако математические формы членов такого ряда можно представить только для самых простых (тривиальных) случаев разложения. В общем же случае для произвольной функции они неизвестны. Это принципиально не позволяет нам вычислить или устранить погрешность, присущую используемым методам разложения.

При $a = 0$ ряд Тейлора переходит в ряд Маклорена:

$$f(x) = f(0) + \frac{xf'(0)}{1!} + \frac{x^2 f''(0)}{2!} + \frac{x^3 f'''(0)}{3!} + \dots + \frac{x^n f^{(n)}(0)}{n!} + R_n(x). \quad (3)$$

Остаточный член разложения по формуле Маклорена имеет вид:

$$R_n(x) = \frac{x^{n+1} f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}. \quad (4)$$

По определению, ξ имеет значение между $a = 0$ и x , и потому здесь пропорциональна x . Ее можно записать как $\xi = \Theta x$, если Θ – некоторое число в интервале $0 < \Theta < x$. Тогда выражение (4) можно представить в виде:

$$R_n(x) = \frac{x^{n+1} f^{(n+1)}(\Theta x)}{(n+1)!}. \quad (5)$$

Составим по (3) ряд Маклорена для бинома $(1+x)^m$:

$$\begin{aligned} (1+x)^m &= 1 + \frac{m}{1!}x + \frac{m(m-1)}{2!}x^2 + \frac{m(m-1)(m-2)}{3!}x^3 + \dots \\ &\dots + \frac{m(m-1)\dots(m-n+1)}{n!}x^n + R_n(x) \end{aligned} \quad (6)$$

Разложим биномы $(1-\lambda)^{1/2}$ и $(1+\lambda)^{1/2}$ в ряд Маклорена:

$$\begin{aligned} (1-\lambda)^{1/2} &= 1 - \frac{1}{2}\lambda - \frac{1}{8}\lambda^2 - \frac{1}{16}\lambda^3 - \frac{5}{128}\lambda^4 - \frac{7}{256}\lambda^5 - \frac{21}{1024}\lambda^6 - \\ &- \frac{33}{2048}\lambda^7 - \frac{429}{32768}\lambda^8 - \frac{715}{65536}\lambda^9 - \frac{2431}{262144}\lambda^{10} - \dots + R_n(-\lambda)^n, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} (1+\lambda)^{1/2} &= 1 + \frac{1}{2}\lambda - \frac{1}{8}\lambda^2 + \frac{1}{16}\lambda^3 - \frac{5}{128}\lambda^4 + \frac{7}{256}\lambda^5 - \frac{21}{1024}\lambda^6 + \\ &+ \frac{33}{2048}\lambda^7 - \frac{429}{32768}\lambda^8 + \frac{715}{65536}\lambda^9 - \frac{2431}{262144}\lambda^{10} + \dots + R_n(\lambda)^n. \end{aligned} \quad (8)$$

Совмещая (7, 8) и используя только положительные корни, получим обобщенное выражение для модифицированных частот обоих диполей:

$$\begin{aligned} \omega_{1,2} &= \omega_0 \left[1 \mp \frac{1}{2}\lambda - \frac{1}{8}\lambda^2 \mp \frac{1}{16}\lambda^3 - \frac{5}{128}\lambda^4 \mp \frac{7}{256}\lambda^5 - \frac{21}{1024}\lambda^6 \mp \right. \\ &\left. \mp \frac{33}{2048}\lambda^7 - \frac{429}{32768}\lambda^8 \mp \frac{715}{65536}\lambda^9 - \frac{2431}{262144}\lambda^{10} \mp \dots + R_n(\mp\lambda)^n \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Используя значения модифицированных частот из (9) и амплитуд из

$$x_1 = \frac{(x_{01} + x_{02})}{\sqrt{2}}, \quad x_2 = \frac{(x_{01} - x_{02})}{\sqrt{2}}$$

в уравнении

$$E = E_{p1} + E_{p2} + E_{p12(p21)} = \frac{m\omega_0^2}{2}(x_{01}^2 + x_{02}^2) - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e^2}{r^3} x_{01}x_{02},$$

можно получить приближенное решение уравнения энергии

$$E = \frac{m\omega_1^2}{2}x_1^2 + \frac{m\omega_2^2}{2}x_2^2,$$

содержащее соответствующую погрешность.

Примем во внимание особые свойства осциллирующих атомов как микрообъектов. Энергии микрообъектов могут принимать только дискретные значения, причем отличающиеся от соседних строго на постоянную величину $h\nu$ (или $\hbar\omega$). Здесь h – постоянная Планка, имеющая смысл элементарного действия и равная $6,6252 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; $\hbar = h / (2\pi) = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Промежуточных значений, а также бесконечно малых или нулевых величин энергий у атомов быть не может. В различных состояниях, например, при разных температурах, под действием внешних полей или после изменений импульсов в столкновениях, атом может характеризоваться различными энергиями, но набор их значений будет квантоваться, т.е. будет дискретным, не сплошным. Эти квантованные (дискретные) значения называют энергетическими уровнями атома.

Энергии колебаний двух осциллирующих атомов – диполей на i -ых энергетических уровнях n_{i1} и n_{i2} , в общем случае будут равны:

$$E_{n_{i1}(2)} = \hbar\omega_{1(2)} \left(n_{i1}(2) - \frac{1}{2} \right), \quad (10)$$

где n_{i1} , n_{i2} – положительные целые числа, равные номерам уровней энергий первого и второго диполей ($n_{i1}(2) = 1, 2, 3 \dots$).

Общая (суммарная) энергия двух квантующихся осцилляторов, совершающих связанные колебания, в соответствии с (10) определится как

$$E_{n_{i1}} + E_{n_{i2}} = \hbar\omega_1 \left(n_{i1} - \frac{1}{2} \right) + \hbar\omega_2 \left(n_{i2} - \frac{1}{2} \right). \quad (11)$$

Подставив из (9) значения ω_1 и ω_2 и ограничившись первыми пятью членами разложения, получим

$$\begin{aligned}
E &\cong \hbar\omega_0 \left(1 - \frac{1}{2}\lambda - \frac{1}{8}\lambda^2 - \frac{1}{16}\lambda^3 - \frac{5}{128}\lambda^4\right) \left(n_i1 - \frac{1}{2}\right) + \\
&+ \hbar\omega_0 \left(1 + \frac{1}{2}\lambda - \frac{1}{8}\lambda^2 + \frac{1}{16}\lambda^3 - \frac{5}{128}\lambda^4\right) \left(n_i2 - \frac{1}{2}\right) = \\
&= \hbar\omega_0 \left(1 - \frac{1}{8}\lambda^2 - \frac{5}{128}\lambda^4\right) (n_i1 + n_i2 - 1) - \hbar\omega_0 \left(\frac{1}{2}\lambda + \frac{1}{16}\lambda^3\right) (n_i1 - n_i2).
\end{aligned} \tag{12}$$

Использование методов разложения в бесконечные ряды вносит неточность в решение задачи как из-за невозможности точного и полного разделения функции, так и вследствие необходимости ограничивать число принимаемых во внимание членов ряда. Погрешность, возникающую по последней причине, называют погрешностью метода. На ее величину можно влиять в некоторых пределах, изменяя число используемых членов разложения. Можно вовсе ее исключить, заменив метод решения.

После подстановки значения λ уравнение энергии (12) примет вид:

$$\begin{aligned}
E &\cong \hbar\omega_0 \left[(n_i1 + n_i2 - 1) \left(1 - \frac{1}{32} \frac{e^4}{\pi^2 \varepsilon_0^2 m^2 \omega_0^4 r^6} - \frac{5}{2048} \frac{e^8}{\pi^4 \varepsilon_0^4 m^4 \omega_0^8 r^{12}} \right) - \right. \\
&\left. - (n_i1 - n_i2) \left(-\frac{1}{4} \frac{e^2}{\pi \varepsilon_0 m \omega_0^2 r^3} - \frac{1}{128} \frac{e^6}{\pi^3 \varepsilon_0^3 m^3 \omega_0^6 r^9} \right) \right].
\end{aligned} \tag{13}$$

Далее используем то обстоятельство, что нулевые колебания происходят при минимально возможных затратах энергии. Состояние, соответствующее самому низкому – первому уровню энергии E_{n_1} , называется основным. Это наиболее стабильное состояние, и осцилляторы, пребывающие в нем, расходуют минимальное количество энергии. Чтобы найти его, необходимо в (10) подставить $n_i1 = n_11 = n_i2 = n_12 = 1$, т.е. первый номер уровня энергии:

$$E_{n_11(2)} = \hbar\omega_0 \left(1 - \frac{1}{2}\right) = \frac{\hbar\omega_0}{2}. \tag{14}$$

Следовательно, наименьшая энергия, которая может расходоваться осциллирующим атомом, равна $\hbar\omega_0/2$.

Из (13) для первых уровней обоих осцилляторов ($n_11 = n_12 = 1$) получим энергию E_{bnd} совместных нулевых колебаний двух диполей, взаимодействующих между собой создаваемыми при колебаниях полями:

$$E_{bnd} = \hbar\omega_0 \left(1 - \frac{e^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 m^2 \omega_0^4 r^6} - \frac{5e^8}{2048\pi^4 \varepsilon_0^4 m^4 \omega_0^8 r^{12}} + \dots \right). \tag{15}$$

Энергия нулевых колебаний двух несвязанных диполей E_{fr} равна сумме их энергий в основных состояниях; согласно с (11), при одинаковых частотах ω_0 :

$$E_{fr} = E_{n_1 1} + E_{n_1 2} = \frac{\hbar\omega_0}{2} + \frac{\hbar\omega_0}{2} = \hbar\omega_0. \quad (16)$$

Сравним (15) и (16): суммарная энергия двух взаимосвязанно осциллирующих диполей (при $r < \infty$, т.е. при любых конечных расстояниях между ними) оказалась меньше суммарной энергии двух несвязанных диполей. Разность выражений (15), (16) называют эффективной энергией взаимодействия:

$$E_{eff} = E_{fr} - E_{bnd} = \hbar\omega_0 \left(\frac{e^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 m^2 \omega_0^4} r^{-6} + \frac{5e^8}{2048\pi^4 \varepsilon_0^4 m^4 \omega_0^8} r^{-12} + \dots \right). \quad (17)$$

Действительно, уменьшение энергии E_{bnd} совместных колебаний двух осцилляторов по сравнению с энергией E_{fr} , которую они расходовали на независимые колебательные действия, означает, что ее часть была затрачена на взаимодействие, т.е. на создание связи между осцилляторами. Действие E_{eff} проявляется в том, что сближающиеся диполи не могут продолжать колебаться независимо и вынуждены согласовывать параметры (амплитуду, частоту) колебаний через параметры (дипольные моменты, напряженности) своих электрических полей. В соответствии с полученным уравнением действие эффективной энергии распространяется на любые конечные расстояния: его слагаемые обращаются в ноль только при $r = \infty$. На практике квантовые взаимодействия между колеблющимися атомами и молекулами уже малозаметны на расстояниях, превышающих их размеры более чем на порядок

Приложение ПЗ

Определение параметров термообработки на основе самосогласованных коэффициентов
избытка воздуха

Выбросы ряда технологических процессов имеют высокое содержание кислорода, что позволяет рассматривать их как загрязненный воздух и использовать в качестве окислителя при сжигании топлива в теплогенераторах, технологических печах или в самих установках термообезвреживания. В таких случаях горючие компоненты отбросных газов могут повлиять на характеристики горения. Поэтому в балансовые расчеты должны быть введены поправки на физический объем, потребность в окислителе, и другие характеристики горючих загрязнителей. Ниже приведены основные формулы и соотношения для подобных расчетов.

$$\alpha = \frac{W_a}{W_f V_{tf}}; \quad (1)$$

$$\beta = W_a \left(1 - \sum_{i=1}^N r_i \right) / (W_f V_{tf}); \quad (2)$$

$$\gamma = W_a \left[1 - \sum_{i=1}^N r_i (1 + V_{ti}) \right] / (W_f V_{tf}); \quad (3)$$

$$A = \frac{\beta}{\beta - \gamma + 1}; \quad (4)$$

$$V_t = (\beta - \gamma + 1) / \left(\alpha - \beta + \frac{1}{V_{tf}} \right), \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (5)$$

$$V_r = A V_t = \beta / \left(\alpha - \beta + \frac{1}{V_{tf}} \right), \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (6)$$

$$R_i = \alpha r_i / \left(\alpha - \beta + \frac{1}{V_{tf}} \right); \sum_{i=1}^N R_i = \alpha \sum_{i=1}^N r_i / \left(\alpha - \beta + \frac{1}{V_{tf}} \right); \quad (7)$$

$$R_f = 1 / [V_{tf} (\alpha - \beta) + 1] = 1 - \sum_{i=1}^N R_i; \quad (8)$$

$$Q_{l(h)} = R_f Q_{l(h)f} + \sum_{i=1}^N R_i Q_{l(h)i}, \text{ кДж/м}^3; \quad (9)$$

$$V_{\text{CO}_2} = R_f V_{\text{CO}_2 f} + \left(\sum_{i=1}^N R_i / \sum_{i=1}^N r_i \right) \sum_{i=1}^N m r_i; \quad (10)$$

$$V_{H_2O} = R_f (V_{H_2O_f} + 1,244d_f) + \left(\sum_{i=1}^N R_i / \sum_{i=1}^N r_i \right) \left(1,244d_a + 0,5 \sum_{i=1}^N n_i r_i \right), \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (11)$$

$$V_{N_2} = 0,01N_{2_f} \cdot R_f + 0,79 A \cdot V_t, \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (12)$$

$$V_{O_2} = 0,21 V_t \cdot (A - 1), \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (13)$$

$$L_{u(l)} = 1 / \left[\left(R_f / L_{u(l)f} \right) + \sum_{i=1}^N \left(R_i / L_{u(l)i} \right) \right], \% \text{ об.}; \quad (14)$$

$$t_c = \frac{R_f (c_{pf} \cdot t_f + Q_{lf}) + \left(\sum_{i=1}^N R_i / \sum_{i=1}^N r_i \right) \left(c_{pa} \cdot t_a + \sum_{i=1}^N Q_{li} \right)}{V_{CO_2} \cdot c_{p_{CO_2}} + V_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} + V_{N_2} \cdot c_{p_{N_2}} + V_{O_2} \cdot c_{p_{O_2}}} =$$

$$= \frac{R_f \left[c_{pf} \cdot t_f + Q_{lf} + \alpha V_{tf} \left(c_{pa} \cdot t_a + \sum_{i=1}^N Q_{li} \right) \right]}{V_{CO_2} \cdot c_{p_{CO_2}} + V_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} + V_{N_2} \cdot c_{p_{N_2}} + V_{O_2} \cdot c_{p_{O_2}}}, ^\circ\text{C}. \quad (15)$$

В формулах (1...15) приняты следующие обозначения: V_t , V_r – теоретический и действительный объемы воздуха для сжигания топливного газа совместно с горючими компонентами газовых выбросов, $\text{м}^3/\text{м}^3$; V_{tf} , V_{ti} – теоретические объемы воздуха, $\text{м}^3/\text{м}^3$, определенные по потребности в окислителе соответственно топливного газа и i -го горючего компонента газовых выбросов; $V_{CO_{2f}}$, $V_{H_{2O}f}$ – теоретические объемы соответствующих компонентов, рассчитанные по составу топливного газа без учета горючих загрязнителей, $\text{м}^3/\text{м}^3$; V_{CO_2} , V_{H_2O} , V_{O_2} , V_{N_2} – самосогласованные объемы соответствующих продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{м}^3$; α , β , γ , – вспомогательные коэффициенты избытка воздуха, с различной степенью приближения показывающие величину избытка воздуха в отбросных газах по отношению к топливному газу; A – действительный коэффициент избытка воздуха, самосогласованно учитывающий количество окислителя в газовых выбросах по отношению к суммарному количеству топливного газа и горючих загрязнителей; W_a , W_f – расходы газовых выбросов и топливного газа, $\text{м}^3/\text{с}$; r_i – объемная доля i -го загрязнителя газовых выбросов; N – число загрязнителей; R_i , R_f – доли i -го горючего загрязнителя и топливного газа по отношению к количеству всех горючих компонентов смеси отбросных газов и топлива; m_i , n_i – соответственно количество атомов углерода и водорода в молекуле i -го горючего загрязнителя; d_f , d_a – соответственно влагосодержания топливного газа и газовых выбросов, $\text{кг}/\text{м}^3$; N_{2_f} – содержание азота в составе топливного газа, % об.; $L_{u(l)f}$, $L_{u(l)i}$, $L_{u(l)}$ – верхние (с индексами “ u ”) и нижние (с индексами “ l ”) пределы воспламенения топливного газа, i -го горючего загрязнителя и их смеси, % об.; $Q_{l(h)f}$, $Q_{l(h)i}$ – низшие (l) и высшие (h) теплоты сгорания топливного газа и i -го горючего компонента

газовых выбросов, кДж/м^3 ; $c_{pf}, c_{pa}, c_{p\text{CO}_2}, c_{p\text{H}_2\text{O}}, c_{p\text{N}_2}, c_{p\text{O}_2}$ – изобарные теплоемкости соответственно топливного газа, отбросных газов и продуктов сгорания, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; t_f, t_a – исходные значения температуры топливного газа и выбросов, $^\circ\text{C}$.

Представленный вариант формул записан для 1 м^3 горючей газообразной смеси (смеси, состоящей из горючих компонентов топливного газа и гомогенных горючих загрязнителей отбросных газов) в нормальных условиях. В расчетах систем с дисперсными горючими органическими загрязнителями объемные доли в соответствующих формулах необходимо заменить на мольные или массовые.

Приведенные формулы являются математически точными, т.е. не вносят дополнительную погрешность в обычные расчетные зависимости для характеристик горения топлива, если загрязнители не содержат в своем составе других элементов, кроме углерода С, водорода Н и кислорода О. Следует иметь в виду, что соотношения (1...15) не приспособлялись для расчетов термоокисления иных видов загрязнителей. В частности, в формулу (5) не включено содержание азота в составе загрязнителей, в формулах (10, 11, 13) подразумевается полное окисление всех горючих реагентов кислородом и т.д. Как было отмечено, термообработка загрязнителей, в молекулы которых входят какие-либо элементы, кроме углерода С, кислорода О и водорода Н, неприемлема.

Приложение П4

Значения чисел Stk и Re_r при скорости невозмущенного потока 0,03–30 м/с для частиц диаметром $(0,5–500) \cdot 10^{-6}$ м.

$$Re_p = u_0 D_p \rho_G / \eta; \rho_G = 1,225 \text{ кг/м}^3; \eta = 17,894 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}; \rho_p = 2000 \text{ кг/м}^3$$

Таблица 1. Значения числа $Stk = 2u_0 r_p^2 \rho_p / (9R_{ob} \cdot \eta)$

$R_{ob} = 10^{-4}$ м	u_0 , м/с						
r_p , м	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
$2.50 \cdot 10^{-7}$	0.000466	0.001552	0.004657	0.015524	0.046571	0.155235	0.465705
$5.00 \cdot 10^{-7}$	0.001863	0.006209	0.018628	0.062094	0.186282	0.620941	1.862822
$2.50 \cdot 10^{-6}$	0.046571	0.155235	0.465705	1.552352	4.657055	15.52352	46.57055
$5.00 \cdot 10^{-6}$	0.186282	0.620941	1.862822	6.209406	18.62822	62.09406	186.2822
$2.50 \cdot 10^{-5}$	4.66	15.52352	46.57055	155.2352	465.7055	1552.352	4657.055
$5.00 \cdot 10^{-5}$	18.62822	62.09406	186.2822	620.9406	1862.822	6209.406	18628.22
$2.50 \cdot 10^{-4}$	465.7055	1552.352	4657.055	15523.52	46570.55	155235.2	465705.5
$R_{ob} = 2 \cdot 10^{-4}$ м	u_0 , м/с						
r_p , м	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
$2.50 \cdot 10^{-7}$	0.000233	0.000776	0.002329	0.007762	0.023285	0.077618	0.232853
$5.00 \cdot 10^{-7}$	0.000931	0.003105	0.009314	0.031047	0.093141	0.31047	0.931411
$2.50 \cdot 10^{-6}$	0.023285	0.077618	0.232853	0.776176	2.328527	7.761758	23.28527
$5.00 \cdot 10^{-6}$	0.093141	0.31047	0.931411	3.104703	9.314109	31.04703	93.14109
$2.50 \cdot 10^{-5}$	2.328527	7.761758	23.28527	77.61758	232.8527	776.1758	2328.527
$5.00 \cdot 10^{-5}$	9.314109	31.04703	93.14109	310.4703	931.4109	3104.703	9314.109
$2.50 \cdot 10^{-4}$	232.8527	776.1758	2328.527	7761.758	23285.27	77617.58	232852.7
$R_{ob} = 5 \cdot 10^{-4}$ м	u_0 , м/с						
r_p , м	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
$2.50 \cdot 10^{-7}$	$9.31 \cdot 10^{-5}$	0.00031	0.000931	0.003105	0.009314	0.031047	0.093141
$5.00 \cdot 10^{-7}$	0.000373	0.001242	0.003726	0.012419	0.037256	0.124188	0.372564
$2.50 \cdot 10^{-6}$	0.009314	0.031047	0.093141	0.31047	0.931411	3.104703	9.314109
$5.00 \cdot 10^{-6}$	0.037256	0.124188	0.372564	1.241881	3.725644	12.41881	37.25644
$2.50 \cdot 10^{-5}$	0.931411	3.104703	9.314109	31.04703	93.14109	310.4703	931.4109
$5.00 \cdot 10^{-5}$	3.725644	12.41881	37.25644	124.1881	372.5644	1241.881	3725.644
$2.50 \cdot 10^{-4}$	93.14109	310.4703	931.4109	3104.703	9314.109	31047.03	93141.09

Продолжение таблицы 1

$R_{ob} = 12,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$							
$r_p, \text{ м}$	$u_0, \text{ м/с}$						
	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
$2,50 \cdot 10^{-7}$	$3,73 \cdot 10^{-5}$	0.000124	0.000373	0.001242	0.003726	0.012419	0.037256
$5,00 \cdot 10^{-7}$	0.000149	0.000497	0.00149	0.004968	0.014903	0.049675	0.149026
$2,50 \cdot 10^{-6}$	0.003726	0.012419	0.037256	0.124188	0.372564	1.241881	3.725644
$5,00 \cdot 10^{-6}$	0.014903	0.049675	0.149026	0.496752	1.490257	4.967525	14.90257
$2,50 \cdot 10^{-5}$	0.372564	1.241881	3.725644	12.41881	37.25644	124.1881	372.5644
$5,00 \cdot 10^{-5}$	1.490257	4.967525	14.90257	49.67525	149.0257	496.7525	1490.257
$2,50 \cdot 10^{-4}$	37.25644	124.1881	372.5644	1241.881	3725.644	12418.81	37256.44

Таблица 2.

Значения числа Re_r

$Re_r = u_0 D_p^4 \rho_p^2 / (\rho_G R_{16}^3 \eta)$							
$R_{ob} = 10^{-4} \text{ м}$							
$D_p, \text{ м}$	$u_0, \text{ м/с}$						
	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
$5,00 \cdot 10^{-7}$	$9,19 \cdot 10^{-5}$	0.000306	0.000919	0.003063	0.009188	0.030626	0.091877
$1,00 \cdot 10^{-6}$	0.00147	0.0049	0.0147	0.049001	0.147004	0.490012	1.470036
$5,00 \cdot 10^{-6}$	0.918773	3.062576	9.187727	30.62576	91.87727	306.2576	918.7727
$1,00 \cdot 10^{-5}$	14.70036	49.00121	147.0036	490.0121	1470.036	4900.121	14700.36
$5,00 \cdot 10^{-5}$	9187.727	30625.76	91877.27	306257.6	918772.7	3062576	9187727
$1,00 \cdot 10^{-4}$	147003.6	490012.1	1470036	4900121	14700363	49001209	$1,47 \cdot 10^8$
$5,00 \cdot 10^{-4}$	91877267	$3,06 \cdot 10^8$	$9,19 \cdot 10^8$	$3,06 \cdot 10^9$	$9,19 \cdot 10^9$	$3,06 \cdot 10^{10}$	$9,19 \cdot 10^{10}$
$R_{ob} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$							
$D_p, \text{ м}$	$u_0, \text{ м/с}$						
	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
$5,00 \cdot 10^{-7}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$3,83 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$3,83 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$3,83 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$
$1,00 \cdot 10^{-6}$	$1,84 \cdot 10^{-4}$	$6,13 \cdot 10^{-4}$	$1,84 \cdot 10^{-3}$	$6,13 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$	$6,13 \cdot 10^{-2}$	$1,84 \cdot 10^{-1}$
$5,00 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-1}$	$3,83 \cdot 10^{-1}$	1.15	3.83	$1,15 \cdot 10^1$	$3,83 \cdot 10^1$	$1,15 \cdot 10^2$
$1,00 \cdot 10^{-5}$	1.84	6.13	$1,84 \cdot 10^1$	$6,13 \cdot 10^1$	$1,84 \cdot 10^2$	$6,13 \cdot 10^2$	$1,84 \cdot 10^3$
$5,00 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^3$	$3,83 \cdot 10^3$	$1,15 \cdot 10^4$	$3,83 \cdot 10^4$	$1,15 \cdot 10^5$	$3,83 \cdot 10^5$	$1,15 \cdot 10^6$
$1,00 \cdot 10^{-4}$	$1,84 \cdot 10^4$	$6,13 \cdot 10^4$	$1,84 \cdot 10^5$	$6,13 \cdot 10^5$	$1,84 \cdot 10^6$	$6,13 \cdot 10^6$	$1,84 \cdot 10^7$
$5,00 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^7$	$3,83 \cdot 10^7$	$1,15 \cdot 10^8$	$3,83 \cdot 10^8$	$1,15 \cdot 10^9$	$3,83 \cdot 10^9$	$1,15 \cdot 10^{10}$

$R_{ob} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$	$u_0, \text{ м/с}$						
$D_p, \text{ м}$	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
$5.00 \cdot 10^{-7}$	$7.35 \cdot 10^{-7}$	$2.45 \cdot 10^{-6}$	$7.35 \cdot 10^{-6}$	$2.45 \cdot 10^{-5}$	$7.35 \cdot 10^{-5}$	$2.45 \cdot 10^{-4}$	$7.35 \cdot 10^{-4}$
$1.00 \cdot 10^{-6}$	$1.18 \cdot 10^{-5}$	$3.92 \cdot 10^{-5}$	$1.18 \cdot 10^{-4}$	$3.92 \cdot 10^{-4}$	$1.18 \cdot 10^{-3}$	$3.92 \cdot 10^{-3}$	$1.18 \cdot 10^{-2}$
$5.00 \cdot 10^{-6}$	$7.35 \cdot 10^{-3}$	$2.45 \cdot 10^{-2}$	$7.35 \cdot 10^{-2}$	$2.45 \cdot 10^{-1}$	$7.35 \cdot 10^{-1}$	2.45	7.35
$1.00 \cdot 10^{-5}$	$1.18 \cdot 10^{-1}$	$3.92 \cdot 10^{-1}$	1.18	3.92	$1.18 \cdot 10^1$	$3.92 \cdot 10^1$	$1.18 \cdot 10^2$
$5.00 \cdot 10^{-5}$	$7.35 \cdot 10^1$	$2.45 \cdot 10^2$	$7.35 \cdot 10^2$	$2.45 \cdot 10^3$	$7.35 \cdot 10^3$	$2.45 \cdot 10^4$	$7.35 \cdot 10^4$
$1.00 \cdot 10^{-4}$	$1.18 \cdot 10^3$	$3.92 \cdot 10^3$	$1.18 \cdot 10^4$	$3.92 \cdot 10^4$	$1.18 \cdot 10^5$	$3.92 \cdot 10^5$	$1.18 \cdot 10^6$
$5.00 \cdot 10^{-4}$	$7.35 \cdot 10^5$	$2.45 \cdot 10^6$	$7.35 \cdot 10^6$	$2.45 \cdot 10^7$	$7.35 \cdot 10^7$	$2.45 \cdot 10^8$	$7.35 \cdot 10^8$
$R_{ob} = 12,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$	$u_0, \text{ м/с}$						
$D_p, \text{ м}$	0.03	0.1	0.3	1	3	10	30
$5.00 \cdot 10^{-7}$	$4.70 \cdot 10^{-8}$	$1.57 \cdot 10^{-7}$	$4.70 \cdot 10^{-7}$	$1.57 \cdot 10^{-6}$	$4.70 \cdot 10^{-6}$	$1.57 \cdot 10^{-5}$	$4.70 \cdot 10^{-5}$
$1.00 \cdot 10^{-6}$	$7.53 \cdot 10^{-7}$	$2.51 \cdot 10^{-6}$	$7.53 \cdot 10^{-6}$	$2.51 \cdot 10^{-5}$	$7.53 \cdot 10^{-5}$	$2.51 \cdot 10^{-4}$	$7.53 \cdot 10^{-4}$
$5.00 \cdot 10^{-6}$	$4.70 \cdot 10^{-4}$	$1.57 \cdot 10^{-3}$	$4.70 \cdot 10^{-3}$	$1.57 \cdot 10^{-2}$	$4.70 \cdot 10^{-2}$	$1.57 \cdot 10^{-1}$	$4.70 \cdot 10^{-1}$
$1.00 \cdot 10^{-5}$	$7.53 \cdot 10^{-3}$	$2.51 \cdot 10^{-2}$	$7.53 \cdot 10^{-2}$	$2.51 \cdot 10^{-1}$	$7.53 \cdot 10^{-1}$	2.51	7.53
$5.00 \cdot 10^{-5}$	4.70	$1.57 \cdot 10^1$	$4.70 \cdot 10^1$	$1.57 \cdot 10^2$	$4.70 \cdot 10^2$	$1.57 \cdot 10^3$	$4.70 \cdot 10^3$
$1.00 \cdot 10^{-4}$	$7.53 \cdot 10^1$	$2.51 \cdot 10^2$	$7.53 \cdot 10^2$	$2.51 \cdot 10^3$	$7.53 \cdot 10^3$	$2.51 \cdot 10^4$	$7.53 \cdot 10^4$
$5.00 \cdot 10^{-4}$	$4.70 \cdot 10^4$	$1.57 \cdot 10^5$	$4.70 \cdot 10^5$	$1.57 \cdot 10^6$	$4.70 \cdot 10^6$	$1.57 \cdot 10^7$	$4.70 \cdot 10^7$

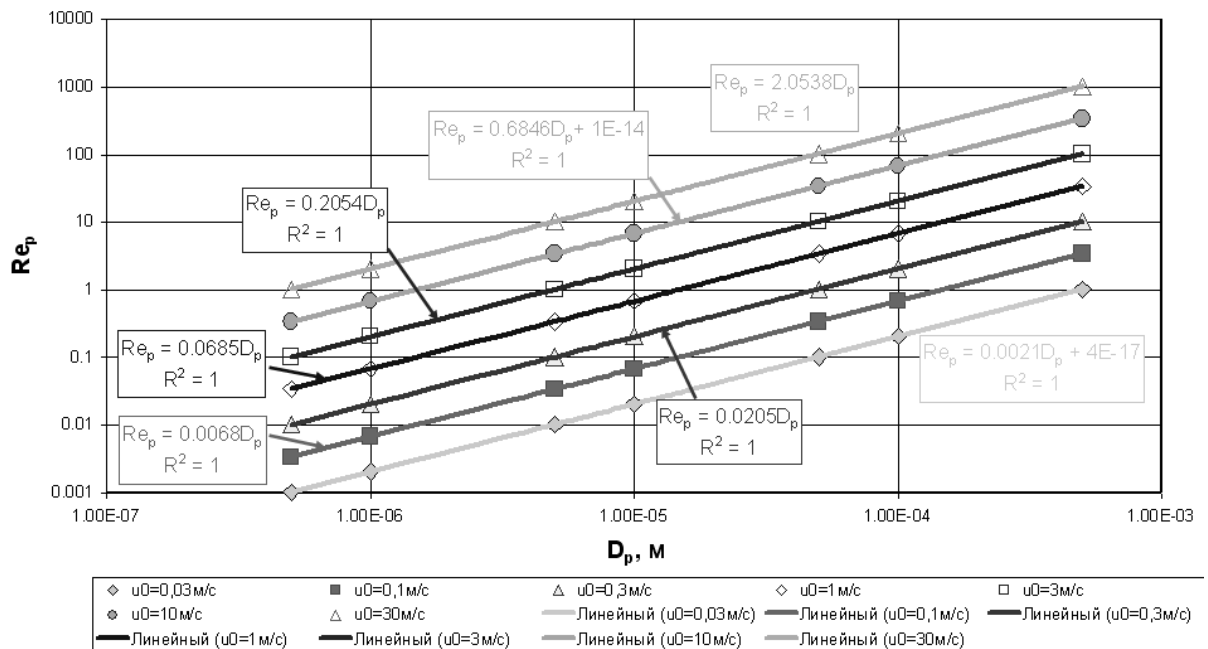


Рис. 1 Значения числа Рейнольдса для частицы в зависимости от ее диаметра

Приложение П5

Результаты расчетов высоты начального подъема струи над источником выбросов

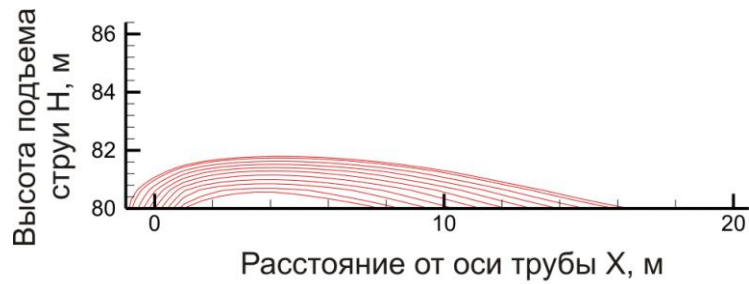


Рис. 1. Эффективная высота выброса H_e струи в атмосферу из трубы высотой $H = 80$ м при $w_0 = 1$ м/с и $u_m = 2$ м/с

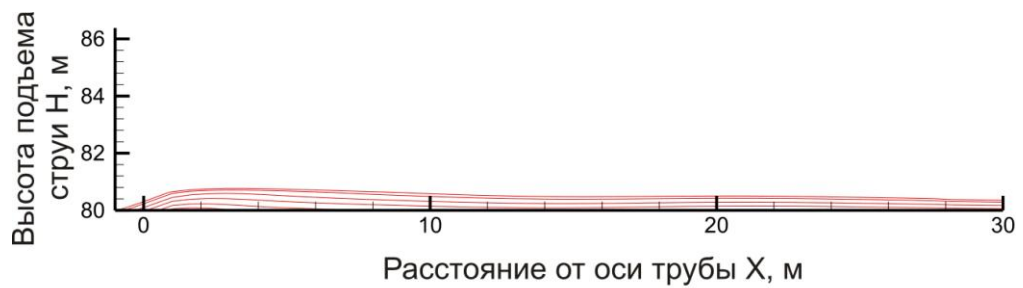


Рис. 2. Эффективная высота выброса H_e струи в атмосферу из трубы высотой $H = 80$ м при $w_0 = 1$ м/с и $u_m = 5$ м/с

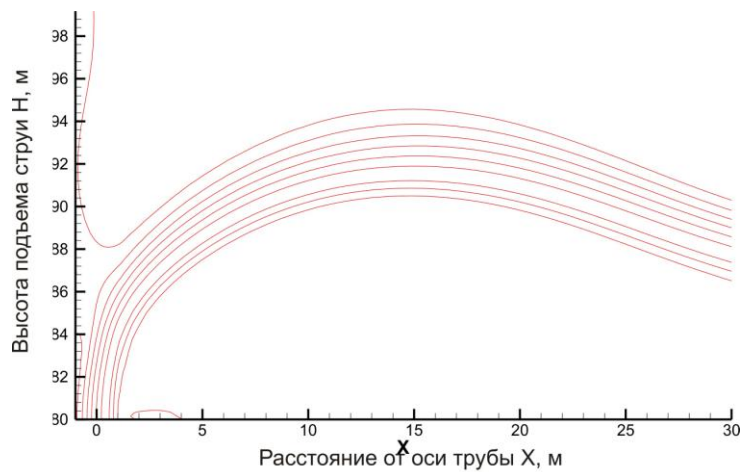


Рис. 3. Эффективная высота выброса H_e струи в атмосферу из трубы высотой $H = 80$ м при $w_0 = 10$ м/с и $u_m = 2$ м/с

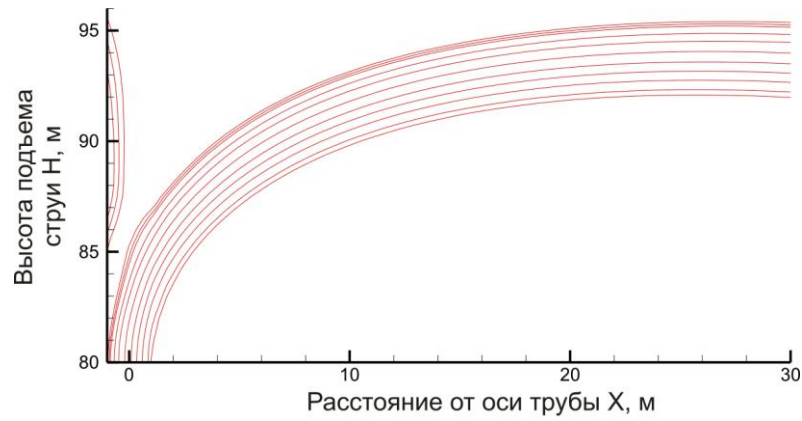


Рис. 4. Эффективная высота выброса H_e струи в атмосферу из трубы высотой $H = 80$ м при $w_0=10\text{м/с}$ и $u_m=3\text{м/с}$

$H = 80$

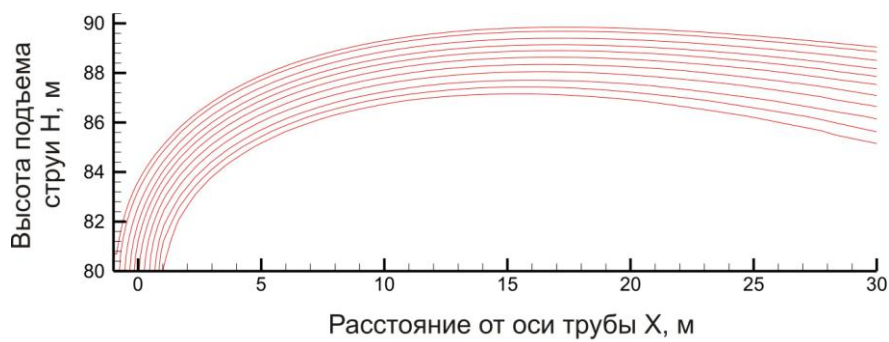


Рис. 5. Эффективная высота выброса H_e струи в атмосферу из трубы высотой $H = 80$ м при $w_0=10\text{м/с}$ и $u_m=5\text{м/с}$ (результаты после 3х-кратной адаптации)

$H = 80$

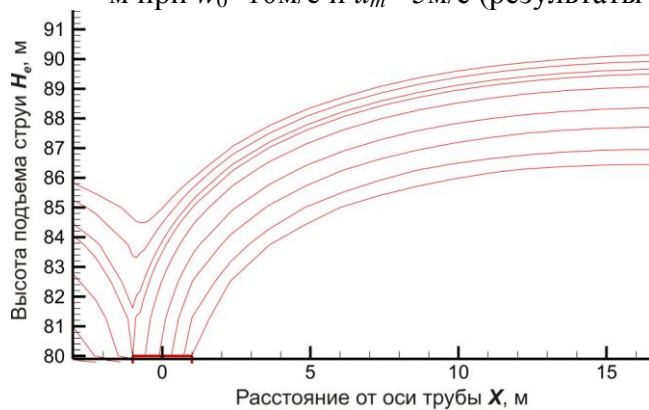


Рис. 6. Эффективная высота выброса H_e струи в атмосферу из трубы высотой $H = 80$ м при $w_0=10\text{м/с}$ и $u_m=5\text{м/с}$ (результаты после 2х-кратной адаптации)

$H = 80$

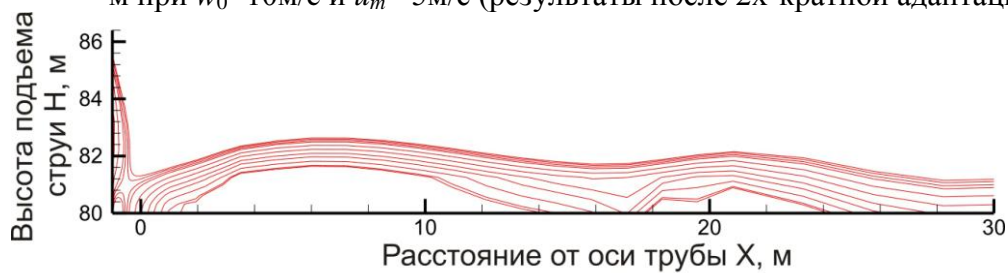


Рис. 7. Эффективная высота выброса H_e струи в атмосферу из трубы высотой $H = 180\text{м}$ при $w_0=1\text{м/с}$ и $u_m=2\text{м/с}$

$H =$

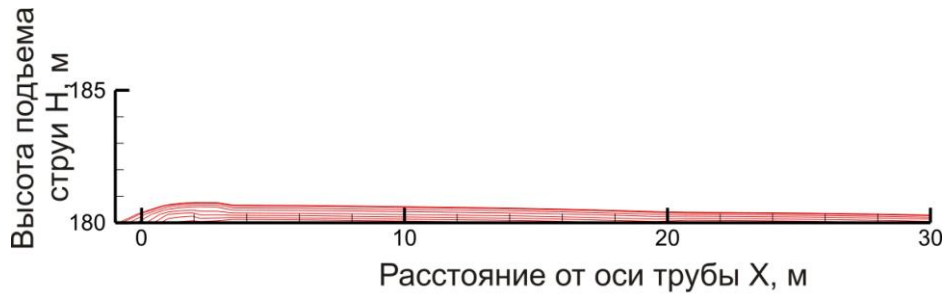


Рис. 8. Эффективная высота выброса H_e струи в атмосферу из трубы высотой $H = 180$ м при $w_0 = 1$ м/с и $u_m = 5$ м/с

$H =$

Таблица 1. Обработка результатов численных исследований

№ опыта	Кодированные переменные			Факторы					Функции отклика			
	X1	X2	X3	H , м	w_0 , м/с	w_0^r	u_m , м/с	u_m^r	ΔH , м	ΔH^r	x , м	x^r
1	-1	-1	-1	80	1	1	3	3	1,03	0,515	2,18	1,09
2	-1	-1	+1	80	1	1	5	5	0,75	0,375	2,25	1,125
3	-1	+1	-1	80	10	10	3	3	15,41	7,705	27,02	13,51
4	-1	+1	+1	80	10	10	5	5	9,85	4,925	17,31	8,655
5	+1	-1	-1	180	1	1	2	2	2,63	1,315	6,63	3,315
6	+1	-1	+1	180	1	1	5	5	0,76	0,38	2,26	1,13
7	+1	+1	-1	180	10	10	2	2	41,00	20,5	80	40
8	+1	+1	+1	180	10	10	5	5	9,79	4,895	17,34	8,67

Таблица 2. Зависимость вспомогательных параметров a , b от относительной скорости ветра

u_m^r	a	b
3	0,7989	-0,2839
5	0,5056	-0,1306

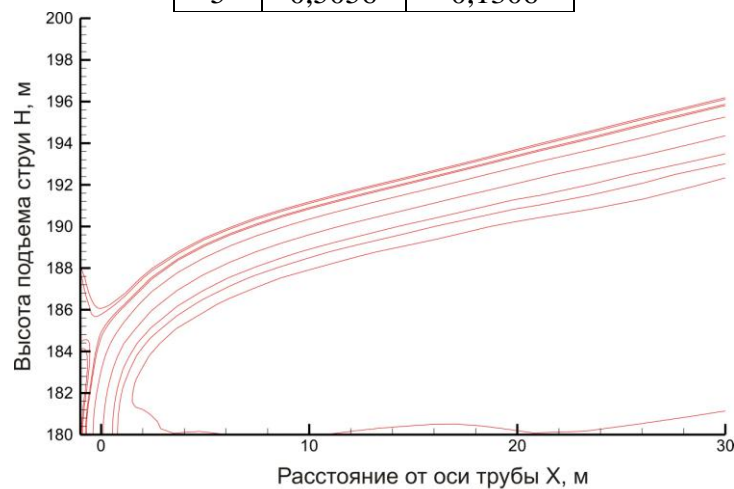


Рис. 9. Эффективная высота выброса H_e струи в атмосферу из трубы высотой $H = 180$ м при $w_0 = 10$ м/с и $u_m = 2$ м/с

$H =$

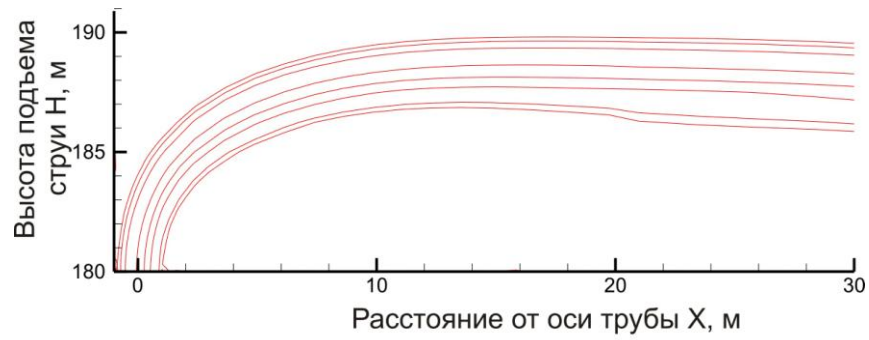


Рис. 10. Эффективная высота выброса H_e струи в атмосферу из трубы высотой $H = 180$ м при $w_0 = 10$ м/с и $u_m = 5$ м/с

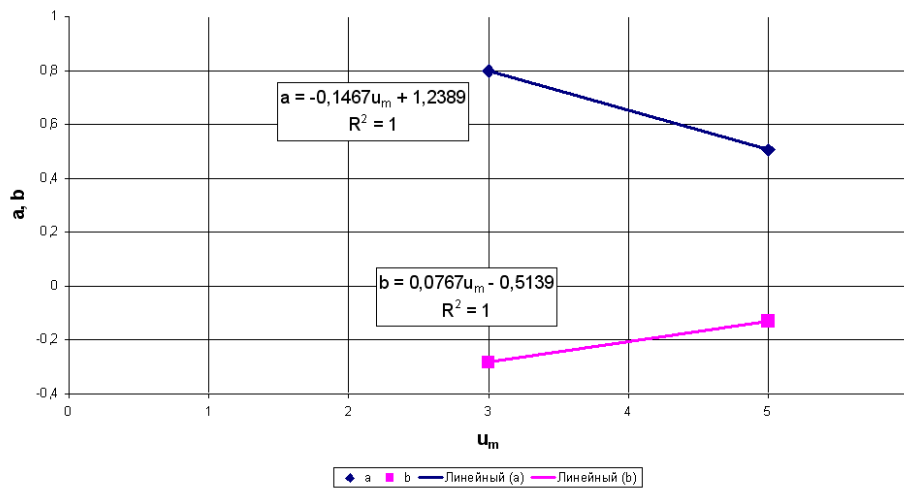


Рис 11. Зависимость коэффициентов регрессии от скорости ветра u_m

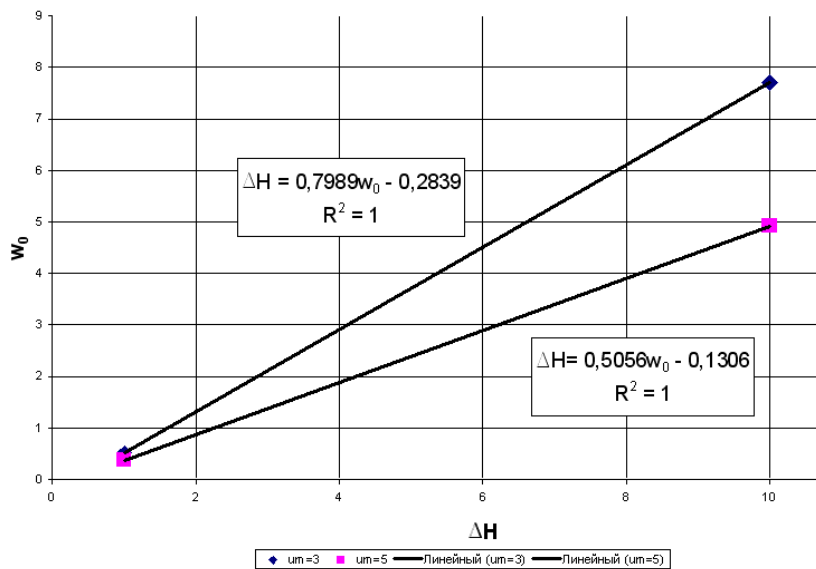


Рис 12. Зависимость относительной высоты подъема струи ΔH от относительной скорости выхода струи w_0

Приложение Пб

Схема термообработки выбросов, содержащих НМЛОС, г. Санкт-Петербург (Ленинград)

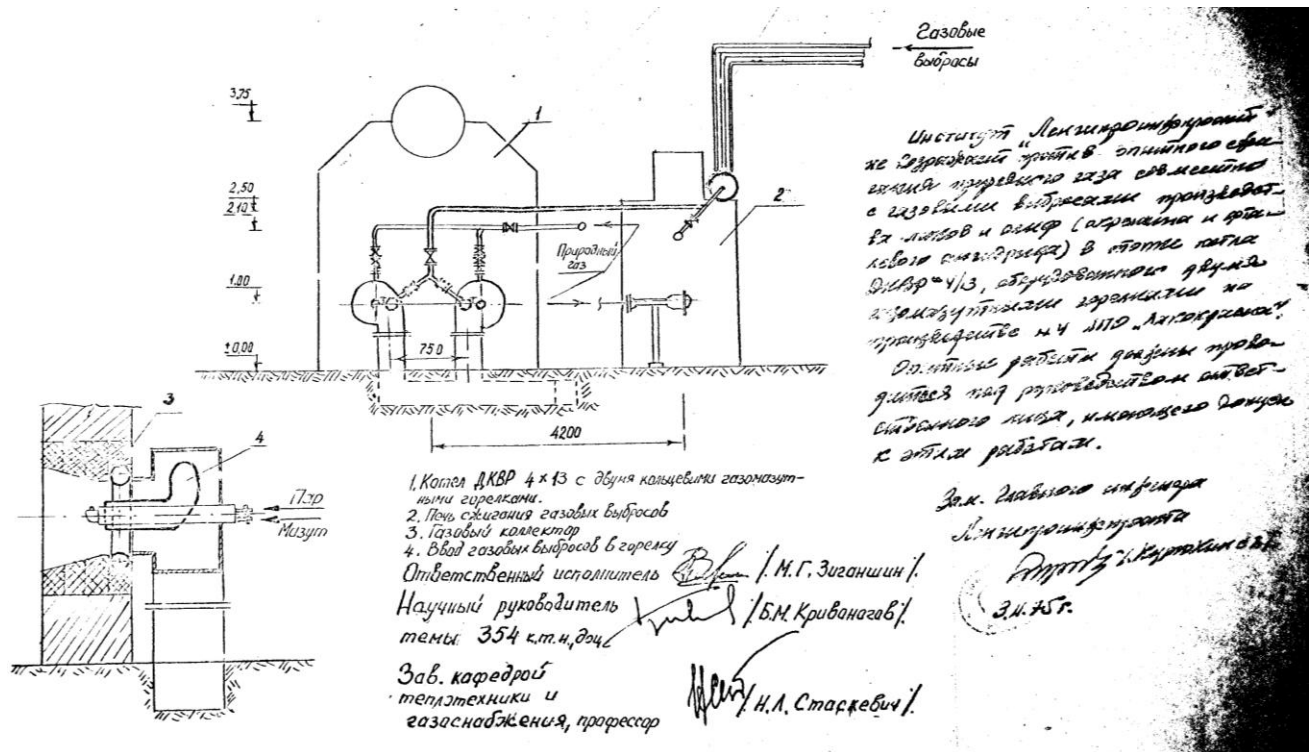


Рис. 1 Переход от схемы термообработки с отдельным подводом выбросов и топлива в печь к схеме использования котлоагрегата с вводом выбросов в топку через газомазутные горелки с периферийной подачей воздуха

Приложение П7

Система комплексной очистки галогенсодержащего выброса

Исследована система комплексной обработки технологических и вентиляционных выбросов с парами галогенсодержащих веществ, состоящая из контактного аппарата, узлов конденсации, фильтрации и термообработки.

Термодеструкция галогенов в контактном аппарате с оксидом металла:



где R – углеводородный радикал, Hal– галоген, Me – металл, $\sum C_m H_n$ – образующиеся углеводороды, t_{opt} – оптимальная температура.

Испытаны два типа контактных устройств, реализующих режимы вытеснения и смешивания. Определены способы и условия надежного обезвреживания.

Реперные точки процесса по температуре наполнителя

Таблица 1. Реперные точки процесса термодеструкция галогенов в контактном аппарате с оксидом металла

Температура, °C	Состояние реагентов	Характеристики и показатели
~175-210	термодеструкция МХ и ПХФ, начало реакции хлора с оксидом железа	отсутствие в газовой фазе МХ и ПХФ при максимальном содержании HCl
~250	интенсивная реакция хлора с оксидом железа в опытах с МХ	снижение содержания HCl в газовой фазе и рост содержания FeCl ₃ в жидкой
275-300	интенсивная реакция хлора с оксидом железа в опытах с ПХФ	снижение содержания HCl в газовой фазе и рост содержания FeCl ₃ в жидкой
300-400.	максимальная скорость реакции хлора с оксидом железа	максимальное содержание ионов хлора в жидкой фазе (~31,5%)
>450	недопустимый температурный режим	Скачок концентрации HCl в газовой фазе

Проводился рентгеноструктурный анализ твердой и элементный анализ жидкой фазы на ионы Fe, Cl, H, C, определялось содержание HCl в газовой фазе. В твердой фазе обнаружены хлориды двух- и трехвалентного железа в кристаллогидратном состоянии, гидроперекиси железа. Анализ проб конденсата показал наличие 20% ионов трехвалентного железа, более 30% ионов хлора, около 10% ионов водорода при незначительном содержании (0... 0,4%) углерода.

Стендовые испытания

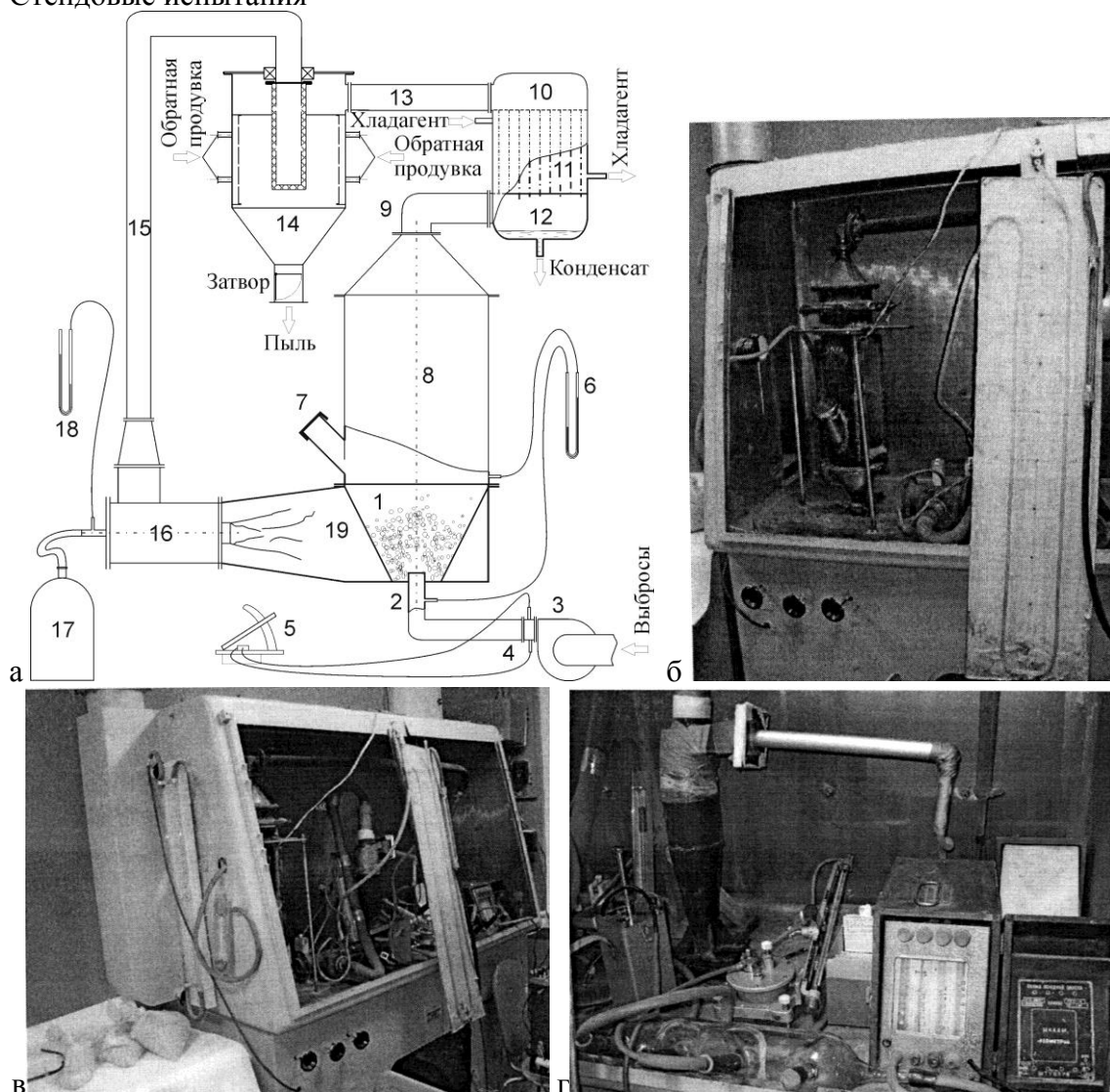


Рис. 1. Стендовая установка: а – схема, б, в, г – фото контактного аппарата и вспомогательных элементов стенда

В конической части 1 контактного аппарата находится слой шамотной крошки размером от 0,6 до 3 мм, импрегнированной порошкообразным γ -оксидом железа с размером частиц менее 0,1 мм. Выбросы подаются вертикально снизу через сопло 2, имеющее диаметр $d_0=25$ мм, вентилятором 3. Их расход определяется при помощи диафрагмы 4 и микроманометра 5. Перепад давления в слое замеряется U-образным манометром 6. Его показания включают также сопротивление узла ввода и конической части аппарата, ввиду чего заранее определяется сопротивление незаполненного аппарата. Патрубок 7 необходим для периодического добавления в фонтанирующий слой оксида железа. При контакте с ним хлорсодержащие компоненты разлагаются с образованием летучих хлоридов железа по реакции (1.8). Ее продукты в парообразном виде проходят через цилиндрическую часть аппарата 8 и направляются по трубопроводу 9 в узел конденсации 10. В межтрубное пространство

конденсатора 11 подается хладагент (рассол) с температурой 0°C , а в трубном хлориды железа конденсируются и выводятся из системы через конденсатосборник 12. Этим обеспечивается удаление хлорсодержащих соединений до пламенной зоны. Содержащий неконденсирующиеся органические соединения газ попадает из конденсатора по трубопроводу 13 в узел циклонной фильтрации 14 для задержки уноса частиц оксида железа и шамотной пыли. После очистки по трубопроводу 15 газ направляется в узел термообработки с горелкой 16, работающей на сжиженном газе от баллона 17. Состав газа устанавливался по результатам периодических замеров плотности пикнометрическим способом, а расход топливного газа определяется по заранее составленной режимной карте горелки и фиксируемому *U*-образным манометром 18 давлению. Тепло продуктов сгорания после горелки частично направляется в металлический короб 19 для подогрева конической части аппарата. При этом реализуется одно из основных преимуществ фонтанирующего слоя – возможность равномерного прогрева материала контактной сорбционной зоны вследствие интенсивного теплообмена в ней.

В отличие от лабораторной 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 хлорсодержащего реагента.

Фонтанирование эффективно и для интенсификации гетерогенной стадии процесса – хемосорбционного хлорирования оксида железа. Скорость этого процесса пропорциональна поверхности массообмена, т.е. зависит от дисперсности частиц. Полифракционный материал с существенной долей тонкодисперсных частиц размером менее 100 мкм псевдоожигению поддается плохо, а организация режима фонтанирования затруднений не вызывает.

Установка опробована при разных концентрациях соединений хлора. Расход выбросов $0,0004 - 0,004\text{ м}^3/\text{с}$, температура в зоне контакта до 400°C . Анализировался состав твердой и жидкой фазы, определялось содержание хлора в продуктах сгорания по HCl . Анализ твердой фазы - γ - и α - оксидов железа, контактировавших с МХ и ПХФ, проводился методом γ -резонансной (ЯГР) спектроскопии. При температуре $\sim 300^{\circ}\text{C}$ и выше на фоне исходных спектров фиксировались линии FeCl_3 до 1,5-2% от общей массы Fe. В продуктах сгорания HCl определялся нефелометрически: обработанные AgNO_3 пробы сопоставлялись со стандартной шкалой.

Температурные пределы обработки, соответствующие минимуму HCl в продуктах сгорания - $250\text{-}350^{\circ}\text{C}$. Ниже 250°C обнаруживается HCl в газовой фазе, а хлор-ион в жидкой и твердой фазах не обнаружен. Это условие разложения галогенов без последующей реакции с оксидами железа. Режиму улавливания на 98% соответствует интервал обработки $300\text{-}350^{\circ}\text{C}$. При 400°C степень очистки снижается до 90%, и далее резко падает. В результате исследований установлено оптимальное сочетание стадий и параметров обработки выбросов с галогенами, обеспечивающих надежное обезвреживание загрязнителей глобального действия.

Узел фильтрации системы комплексной обработки

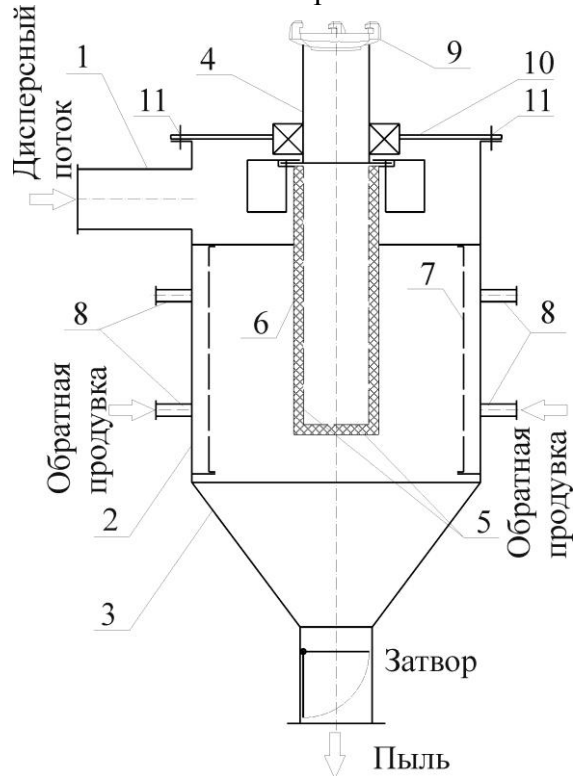


Рис. 2. Схема циклона – фильтра

Существующие конструкции отечественных и зарубежных циклонов имеют низкую степень очистки фракций пыли размером менее 15...20 мкм. Это связано с тем, что степень инерционного пылеосаждения при вращательном движении дисперсного потока в циклоне возрастает с уменьшением его поперечного размера и увеличением скорости потока. Однако увеличение скорости сверх оптимального для данного типа циклона ведет к его быстрому абразивному износу, а уменьшение поперечного размера при соблюдении оптимальной скорости – к снижению пропускной способности. Для осаждения тонкодисперсной взвеси система очистки должна оборудоваться дополнительными ступенями – фильтрующими устройствами.

Используемый в схеме фильтрующий аппарат совмещает функции циклона и тканевого фильтра. Он содержит штуцер для ввода запыленного газового потока 1, установленный тангенциально на цилиндрическом корпусе 2, имеющем коническое днище 3; расположенную соосно с цилиндрическим корпусом выхлопную трубу 4 с присоединенным к ней (например, при помощи цапфового соединения) сварным каркасом 5 с закрепленным на нем плотным фильтровальным материалом 6 (например, войлоком или фетром); закрепленную на внутренней поверхности цилиндрического корпуса 1 циклона-фильтра тонкую фильтровальную ткань 7 (например, ткань лавсан Л-4, арт. 217); установленные радиально снаружи цилиндрического корпуса 1 продувочные штуцера 8; цапфу 9 на верхнем срезе выхлопной трубы 4; установленный на верхней кромке цилиндрического корпуса 1 торец – крышку 10 циклона-фильтра, в виде фланца с центральным отверстием для выхлопной трубы 4; детали 11 крепежа

цилиндрического корпуса 1 с торцом 10. Драпировка тканью 7 внутренней поверхности цилиндрической части корпуса 2 сохраняет ее от абразивного износа и позволяет увеличить скорость до 30 м/с. Это соответствует инерционному осаждению частиц размером 1мкм. Частицы меньшего (субмикронного) диапазона оседают на плотном фильтровальном материале 6, закрепленном на каркасе 5. При увеличении скорости потока с оптимального для серийных циклонов типа ЦН-24 значения 4,5 м/с до 18 м/с диаметр частиц, улавливаемых на 50%, уменьшается с 8,5мкм до 0,4мкм.

Приложение П8. Внедрение результатов исследований

Приложение к Акту внедрения проектной деятельности по проекту совместного осуществления

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

по проектной деятельности по ПСО «Комплексная обработка выбросов, содержащих галогены (гексафторид серы)». Анализ базовой линии и условия дополнительности

Проектная деятельность предполагает подготовку документации в соответствии с условиями «механизма гибкости» РКИК ООН (Киотского протокола) – ПСО, для оснащения генерирующих предприятий системой комплексной обработки выбросов источников выделения гексафторида серы.

Сводом правил СП 90 [2] 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.

Исходные данные для проектирования комплексной установки обработки галогенсодержащих выбросов ТЭС, получены в соответствии с требованиями нормативного документа [1].

На станции с установленной электрической мощностью 200 МВт в воздухе типового помещения КРУЭ объемом не менее 1200 м³ при нормальных условиях может находиться до 1,2 м³ гексафторида серы. Принимая нормативную концентрацию за максимально возможную и, исходя из условия ее достижения не чаще, чем каждый 999-ый час, при 7000 часах работы ячейки в год и трехкратном воздухообмене в помещениях с КРУЭ нормативный выброс гексафторида серы может достигать $1,2 \times 3 \times 7000 \times 0,001 = 25,2$ м³/год. Это порядка 165 кг/год SF₆, или в пересчете по GWP – около 4 тыс. тонн CO₂-экв в год, что составляет 20 тонн CO₂-экв в год на 1 МВт установленной электрической мощности. Максимальный (разовый) расчетный выброс для аварийной ситуации, соответствующий разрыву одного резервуара, может составлять порядка 0,05 кг/ч (1,195 тонн CO₂-экв в час) на 1 МВт установленной электрической мощности.

Далее показана возможность внедрения на филиалах ОАО «Генерирующая компания» комплексной обработки вентиляционного выброса помещений КРУЭ, содержащего элегаз, с использованием ПСО (Joint Implementation,JI) как одного из инструментов («механизмов гибкости») Киотского протокола. Как известно, Стороны-участники ПСО, включенные в Приложение I Киотского протокола, могут оказывать в его рамках финансовое и технологическое содействие другим сторонам, также включенным в Приложение I, в реализации проектов сокращения выбросов парниковых газов (ПГ). При этом общий лимит на выбросы Сторон Приложения I не изменится, а будет произведена передача разрешений на выбросы между Сторонами. В дополнение к тому, ОАО «Генерирующая компания» сможет в дальнейшем распространять результаты внедрения по всем европейским генерирующим предприятиям, имеющим квоты выброса ПГ и жесткий контроль за использованием элегаза. Однако ПСО могут выполняться только при соблюдении условия дополнительности. Это требует доказательства, 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

² Свод правил «Электростанции тепловые». Актуализированная редакция СНиП II-58-75. Thermalpowerstations. СП 90.13330.2012. Утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.2012 N 282 и введен в действие с 1 января 2013 г.

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 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 Совещанию Сторон Киотского протокола. В рассматриваемом случае имеется возможность адаптации утвержденной методологии МЧР АМ0001/Версия 05.1 «Сжигание отбросных потоков хладона-23», действующей с 22 декабря 2006 г.. В 2009 г. она была распространена на совместную обработку хладона и элегаза [3].

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 SF_6 , выбрасываемое предприятием, может достигать до 165 кг/год, или около 4 тыс. тонн CO_2 -экв в год. При этом допускается максимальный разовый выброс в экстремальной ситуации до 10 кг/ч (до 240 тонн CO_2 -экв в час). Элегаз не оказывает токсического действия на организм человека, но при повышенной концентрации может привести к асфиксии. Гексафторид серы на сегодняшний день филиалами не утилизируется. Такая ситуация может сохраняться и в дальнейшем, так как филиалы не нарушают никаких норм, имеют 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 Киотского протокола. В большинстве развивающихся стран выбросы SF_6 не нормируются. В РФ выбросы гексафторида серы нормируются, но плата за них не установлена, и филиалы за эти выбросы не платят. Какие-либо ограничения на выбросы парниковых газов для отдельных предприятий в России отсутствуют и в ближайшие годы не предвидятся.

Сообразно с самой методологией АМ0001, 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 Киотского протокола – CO_2 , в ближайшей перспективе не предвидится. Поэтому при появлении чрезвычайной необходимости в РФ могут начать уменьшение общего выброса ПГ 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 филиалы ОАО «Генерирующая компания» не имеют установок по утилизации SF_6 .

На предприятии ООО «Завод полимеров КЧХК» [2] 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

³ 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.

проблематично в силу многих причин. Прежде всего, адаптация такой установки для обработки только одного компонента – SF_6 , вместо смеси хладагona-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 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 [2]. 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 филиалам и генерирующей компании в целом не только экономических, но и экологических или каких-либо иных преференций. Филиалы и без того не превышают 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 филиалов 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, филиалы не заинтересованы 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, поступающего до его реализации в атмосферу. Учитывая высокое значение его потенциала глобального потепления, это приведет к заметному снижению вредного антропогенного воздействия на климатическую систему. Определенное в соответствии с актуализированными нормативами СП 90 сокращение выбросов ПГ составляет порядка 19,75 тонн CO_2 -экв в год на 1 МВт установленной электрической мощности. При этом для экстремальной ситуации предусматривается возможность обработки максимального разового выброса в количестве 1,195 тонн CO_2 -экв в час на 1 МВт установленной электрической мощности.

Филиалы имеют согласованные ПДВ для всех источников гексафторида серы. В настоящее время весь объем образующихся выбросов, содержащих гексафторид серы, поступает в атмосферу. Утилизировать весь объем отходов на существующих установках невозможно. Возможность продаж гексафторида серы в качестве товарного продукта практически исключена. Без реализации ПСО филиалы и ОАО «Генерирующая компания» в соответствии с существующей практикой не взяли бы за предотвращение попадания гексафторида серы в атмосферу, 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 ПФ на углеродном рынке в рамках механизмов гибкости Киотского протокола. При существующей (2012 г.) цене в Европе 13 \$ за 1 т CO_2 -экв потенциальная выгода с продаж составит 256,75 \$ на 1 МВт установленной электрической мощности.

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 исключающим 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 SF_6 , 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 SF_6 . 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 SF_6 предприятие не получило бы никаких существенных выгод, не считая потенциальной выгоды от продажи сокращений выбросов ПФ на углеродном рынке в рамках предлагаемого ПСО как одного из механизмов гибкости Киотского протокола.

3. В настоящее время в России общей практикой для предприятий-энергопроизводителей является согласование ПДВ для источников SF_6 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 ПФ. Путем проведения предложенной проектной деятельности можно достичь практически полного разложения SF_6 . Следовательно, в случае реализации предлагаемого ПСО, количество предотвращенного выброса SF_6 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.



АКТ

**внедрения проектной деятельности по проекту совместного осуществления (ПСО)
«Комплексная обработка выбросов, содержащих галогены (гексафторид серы)»**

На генерирующих предприятиях ОАО «Генерирующая компания» внедрена проектная деятельность по ПСО «Комплексная обработка выбросов, содержащих галогены (гексафторид серы)». Проектная деятельность включает инициирование подготовки документации, удовлетворяющей требованиям «механизма гибкости» РКИК ООН (Киотского протокола) – ПСО, и получению финансирования, с последующим оснащением генерирующих предприятий системой обработки выбросов источников выделения гексафторида серы. Основаниями для внедрения проектной деятельности служат:

1. Рекомендации Государственного доклада РТ о практическом применении предлагаемой системы комплексной обработки галогенсодержащих выбросов (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).
2. Нормативный документ СП 90.13330.2012 (Актуализированная редакция «СНиП II-58-75 Электростанции тепловые»)
3. Наличие утвержденной Исполнительным советом Механизма чистого развития (МЧР) Совещания Сторон Киотского протокола методологии МЧР АМ0001/Версия 05.1 «Сжигание отбросных потоков хладона-23», действующей с 22 декабря 2006 г., и распространенной в 2009 г. на совместную обработку хладона и элегаза (см.: Проектная деятельность «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.)
4. Доказательство условия дополнительности (см. Приложение) проектной деятельности по ПСО «Комплексная обработка выбросов, содержащих галогены (гексафторид серы)», на основании методологии АМ0001/Версия 05.1, позволяющее инициирование проектной деятельности по ПСО.

Исходные данные для технического задания на проектирование установки комплексной обработки выбросов ТЭС, рассчитаны в соответствии с п.п. 10.1.73, 10.1.74 СП 90. Средняя производительность установки должна обеспечивать обработку элегаза в количестве $0,825 \cdot 10^{-3}$ т (в пересчете по потенциалу глобального потепления GWP – 19,75 тонн CO₂-экв) в год на 1 МВт установленной электрической мощности. Для экстремальной ситуации предусматривается возможность обработки максимального разового выброса, исходя из возможности разрыва одного резервуара (п. 10.1.74), в количестве 0,05 кг/ч (1,195 тонн CO₂-экв в час) на 1 МВт установленной электрической мощности.

Наличие официально утвержденной в рамках Киотского протокола методологии МЧР АМ0001/Версия 05.1 является одним из основных условий, обеспечивающих реальную

возможность утверждения документации и получения финансирования на оснащение предприятий ОАО «Генерирующая компания» системой комплексной обработки вентиляционных выбросов от источников выделения гексафторида серы. В соответствии с условиями «механизма гибкости» ОАО «Генерирующая компания» получит финансовое и технологическое содействие от Сторон, включенных в Приложение I Киотского протокола, с передачей разрешений на выбросы парниковых газов (ПГ) в соответствующем объеме. В дальнейшем ОАО «Генерирующая компания» сможет распространять результаты внедрения по генерирующим предприятиям ЕС, имеющим квоты выброса ПГ и жесткий контроль за использованием элегаза.

На основании методологии АМ0001/Версия 05.1 выполнен анализ четырех альтернатив проекту ПСО комплексной обработки галогенсодержащих загрязнителей вентиляционных выбросов помещений КРУЭ и выбор базовой линии, проведено доказательство соблюдения условия дополнительности, т.е. того, что сокращение выбросов было бы невозможно без предлагаемого ПСО (см. Приложение). Доказательство дополнительности является условием, без которого выполнение проектной деятельности по ПСО не допускается, и является исходной позицией, позволяющей ОАО «Генерирующая компания» приступить к процедуре инициирования проектной деятельности по ПСО «Комплексная обработка выбросов, содержащих галогены (гексафторид серы)». Данный проект ПСО предусматривает утилизацию практически всего объема гексафторида серы, выбрасываемого до его реализации в атмосферу. Учитывая высокое значение потенциала глобального потепления SF_6 , это приведет к снижению вредного антропогенного воздействия на климат планеты.

При существующей (2012 г.) цене в Европе 13 USD за 1 т CO_2 -экв потенциальная выгода ОАО «Генерирующая компания» с продаж сокращений выбросов ПГ на углеродном рынке в рамках механизмов гибкости Киотского протокола составляет 256,75 USD в год на 1 МВт установленной электрической мощности. В расчете на установленную электрическую мощность всех ТЭС 3790 МВт потенциальная прибыль с продаж ОАО «Генерирующая компания» в целом составляет 97308,25 USD, или 32, 112 млн. руб. (по текущему курсу).

Секретарь НТС ОАО «Генерирующая компания»



А.Д. Добронравов

Приложение к Акту внедрения предложений по сокращению выброса косвенных парниковых газов при работе котлоагрегатов и ГТУ ТЭЦ на филиалах ОАО «Генерирующая компания»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

по Акту внедрения предложений по сокращению выброса косвенных парниковых газов при работе котлоагрегатов и ГТУ ТЭЦ на филиалах ОАО «Генерирующая компания»

В 2012 году валовые выбросы в атмосферу по ОАО «Генерирующая компания» указанных загрязняющих веществ составили: НМЛОС – 48,554 т, оксида углерода – 2292,001 т. Выброс оксидов азота (в пересчете на NO_2) составил 12 281,465 т, и по сравнению с 2011 г. возрос, как и выброс оксида углерода. Увеличение выброса оксидов азота на Казанской ТЭЦ-1 на 127,395 т и Набережночелнинской ТЭЦ на 207,339 т обусловлено ростом выработки электроэнергии и соответствующим увеличением расхода топлива. Вдобавок к этому, в 1,8 раза повысился расход топлива на ГТУ Казанской ТЭЦ-1, причем инструментальные замеры фактических концентраций оксидов азота показали от ГТУ более высокие значения выбросов загрязняющих веществ (ЗВ), чем от котлов ТГМ-84Б.

В соответствии с данными отчета ОАО «Генерирующая компания» за 2012 г., по вышеуказанным причинам увеличился также выброс оксида углерода, на Казанской ТЭЦ-1 – на 158,124 т, на Набережночелнинской ТЭЦ – на 74,762 т. Для снижения количества выбросов ЗВ и улучшения экологической обстановки в районе расположения филиалов ОАО «Генерирующая компания» предлагается проработать варианты внедрения на филиалах технологий очистки оксидов азота и сернистого ангидрида в дымовых газах, и считать приоритетными в ОАО «Генерирующая компания» природоохранные мероприятия, направленные на: широкое внедрение таких воздухоохраных мероприятий, как нестехиометрическое сжигание топлива с малыми избытками воздуха, ступенчатое и ярусное горение; внедрение высокоэффективных горелок и форсунок; внедрение систем оптимизации процессов горения и мониторинга дымовых газов.

В соответствии с указанными приоритетами разработаны предложения по внедрению высокоэффективного горелочного устройства (см. рис.) для стадии дожигания ступенчатого и ярусного горения с целью сокращения выброса НМЛОС, СО и оксидов азота при работе котлоагрегатов и ГТУ на объектах ОАО «Генерирующая компания».

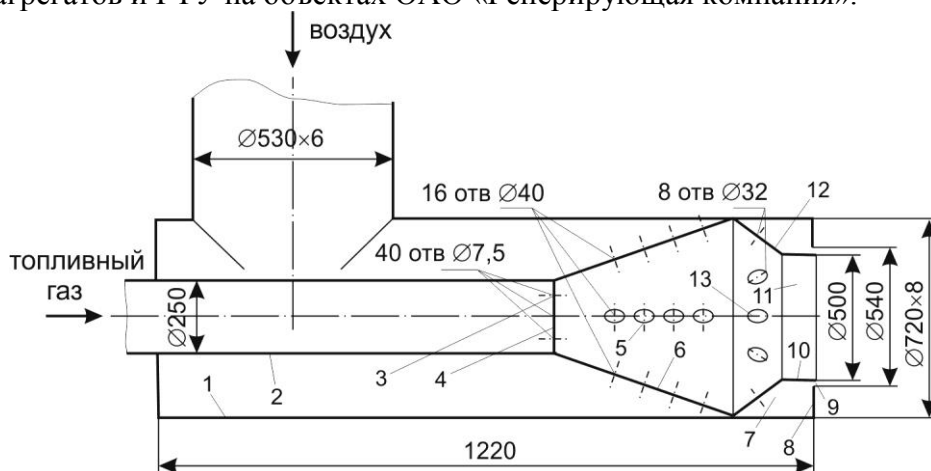


Рис. 1 Схема горелочного устройства: 1, 2 – воздушный и газовый тракты; 3 – отверстия в шайбе 4 для распределения газового потока; 5 – отверстия для прохода воздушного потока в диффузор 6; 7 – камера для снижения скорости газозвушной смеси; 8 – шайба; 9 – кольцевая щель; 10 – цилиндрическая часть смесителя; 11 – огневое отверстие; 12 – конфузор смесителя с отверстиями 13.

Предложения составлены по результатам теоретических и экспериментальных исследований по обработке выбросов, содержащих НМЛОС и СО, в т.ч. опытно-промышленных исследований на предприятиях неэнергетического профиля г.г. Казани и Санкт-

Петербурга. Для оптимизации процессов горения предлагается внедрение высокоэффективных горелок, исследованных на указанных предприятиях, с использованием их в процессах нестехиометрического сжигания топлива на стадиях дожига ступенчатого и ярусного горения. Конструкции горелок и методика расчета рабочих характеристик топочных и горелочных устройств представлены в работах [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Исследования показали, что при их использовании для нестехиометрического ступенчатого сжигания топлива можно понизить образование оксидов азота в пламенной зоне ориентировочно на 20% за счет снижения средней температуры процесса. Кроме того, повышение концентрации кислорода на стадии дожига приводит, по закону действия масс, к росту констант скоростей реакций окисления в зоне горения, что обеспечивает сокращение валового выброса CO и НМЛОС на 35% и 70% соответственно.

Таблица 1

Предотвращенный ущерб и снижение платы за выбросы при применении предложенных горелочных устройств на филиалах ОАО «Генерирующая компания»

Вещество	Формула	Валовой выброс загрязнителя до/после обработки т/год	Снижение валового выброса загрязнителя т/год	Норматив платы в пределах установленных лимитов, руб/т	Коэфф. экологич. ситуации и экологич. значимости	Коэфф. индекса платы за загрязнение на 2013 г.	Плата в пределах установленных лимитов по тарифам на 2013 г., руб/т	Экономия предприятия вследствие снижения платы за выбросы, руб/год
1. Азота диоксид	NO ₂	12281,465/ 9825,172	2456,293	52	1,9	2,2	217,36	533899,85
3. Акролеин	CH ₂ CH CHO	24,277/ 7,283	16,994	68	1,9	2,2	284,24	4830,37
79. Углерода оксид	CO	2292,001/ 1489,801	802,2	0,6	1,9	2,2	2,51	2013,52
184. Формальдегид	HCHO	24,277/ 7,283	16,994	683	1,9	2,2	2854,94	48516,56
Итого 589260,3								

Таблица 2

Капитальные вложения на вне

дрение высокоэффективных горелок для организации ступенчатого и ярусного горения

№	Статьи расходов	Кол-во	Стоимость, млн. руб.	
			единицы	всего
1	Газогорелочные устройства, шт.	12	0,015	0,180
2	Газопроводы обвязки, продувки, безопасности, т:			

⁴ Зиганшин, М.Г. Газогорелочное устройство для термообработки отбросных газов / Тепломассообмен и гидромеханика элементов систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, пыле – и газоочистки // Отчет НИР (промежуточный): ВНИЦентр, № гос. регистрации 01860050341/ М.Г. Зиганшин и др. – Казань, КИСИ, 1991. – 43с.

⁵ 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.

⁶ Кривоногов, Б. М. Исследование сжигания отбросных газов лакокрасочного производства при их раздельном 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

⁷ Зиганшин, М.Г. Термическое обезвреживание токсичных атмосферных выбросов, с утилизацией тепла продуктов сгорания//Теплообмен в отопительно-вентиляционных устройствах: Межвуз. сб./ М. Г. Зиганшин. – Казань, КХТИ, 1987. – С.67-71.

⁸ Зиганшин, М.Г. 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.

⁹ 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.

	d _у 25	0,25	0,035	0,00875
	d _у 40	0,2	0,035	0,007
	Ø 108×5	0,513	0,36	0,18468
3	Предохранительные запорные клапаны ПКНэ (ПКВэ) с электромагнитным исполнительным механизмом на обвязочных газопроводах, шт.	36	0,016	0,576
4	Электромагнитные клапаны КЭГ-9720 на трубопроводах продувки и безопасности, шт.	14	0,002	0,028
5	Затраты по переоборудованию топок, шт.	2		0,800
6	Затраты по переналадке АСУ ТП ГТУ ТЭЦ, шт.	1		0,250
7	Итого			2,03443

В предположении, что НМЛОС состоит наполовину из формальдегида и наполовину из акролеина как первичных продуктов окисления метана и высших углеводородов, определена величина предотвращенного ущерба в условиях применения предложенных горелочных устройств на филиалах ОАО «Генерирующая компания» (табл. 1).

На стадиях дожига ступенчатого и ярусного горения может быть установлено до 12 горелок. Основные статьи капитальных вложений при стоимости изготовления 1 горелочного устройства 15000 руб. приведены в таблице 2.

Таким образом, сумма капитальных вложений составляет 2,03443 млн. руб. Изменение величины эксплуатационных расходов можно считать несущественным, за исключением определенной выше годовой экономии предприятием платы за выбросы. Следовательно, срок окупаемости Т капитальных вложений за счет указанной экономии не будет превышать: $T = 2,03443 / 0,5892603 = 42$ месяцев.

«УТВЕРЖДАЮ»



Генеральный директор

ОАО «Генерирующая компания»

Р.М.Хазиев

12 2013 г.

АКТ**внедрения предложений по сокращению выброса косвенных парниковых газов при работе котлоагрегатов и ГТУ ТЭЦ на филиалах ОАО «Генерирующая компания»**

На филиалах ОАО «Генерирующая компания» принято к внедрению предложение по сокращению выброса на генерирующих предприятиях косвенных парниковых газов – неметановых летучих органических соединений (НМЛОС) и оксида углерода СО, выделяющихся в качестве продуктов химического недожога при работе газогорелочных устройств котлоагрегатов и ГТУ ТЭЦ. По ОАО «Генерирующая компания» в 2012 году валовые выбросы загрязняющих веществ с дымовыми газами составили: НМЛОС – 48,554 т, СО – 2292,001 т, оксидов азота NO_x (в пересчете на NO₂) 12 281,465 т. При этом выброс NO_x и СО по сравнению с 2011 г. возрос, что обусловлено ростом выработки электроэнергии и расхода сжигаемого топлива. Для дальнейшего снижения выброса загрязняющих веществ с продуктами горения предлагается внедрение высокоэффективных горелок в процессах нестехиометрического сжигания топлива на стадиях дожига ступенчатого и ярусного горения по результатам работ, представленных в приложении.

Основанием для внедрения служат:

5. Соответствие указанного предложения обязательствам в области охраны окружающей среды ОАО «Генерирующая компания» и филиалов, провозглашенным в Экологической политике, ее целевым и плановым показателям, реализуемым через экологическую программу компании, сформированную по экологическим программам филиалов с учетом специфики их работы.
6. Соответствие указанного предложения требованиям внедренной на филиалах ОАО «Генерирующая компания» системы экологического менеджмента как инструмента реализации Экологической политики, сертифицированной на соответствие требованиям международного стандарта ISO 14001:2004.
7. Рекомендации Государственного доклада РТ о практическом применении предлагаемого газогорелочного устройства, являющегося основным функциональным элементом узла термообработки в системе комплексной обработки галогенсодержащих выбросов (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).

В соответствии с Экологической политикой, для снижения количества выбросов ЗВ и улучшения экологической обстановки в районе расположения филиалов в ОАО «Генерирующая компания» являются приоритетными природоохранные мероприятия, направленные на: широкое внедрение таких воздухоохраных мероприятий, как нестехиометрическое сжигание топлива с малыми избытками воздуха, ступенчатое и ярусное горение; внедрение высокоэффективных горелок и форсунок; внедрение систем оптимизации

процессов горения и мониторинга дымовых газов. Предложения по внедрению методов, направленных на сокращение выброса НМЛОС, СО и оксидов азота при работе котлоагрегатов и ГТУ на объектах ОАО «Генерирующая компания», разработаны сообразно с указанными приоритетами. Предложения прошли опытно-промышленные испытания на ряде предприятий неэнергетического профиля в г.г. Казани и Санкт-Петербурге.

По результатам испытаний, использование предлагаемых горелочных устройств позволяет за счет снижения средней температуры процесса при нестехиометрическом ступенчатом сжигании топлива понизить ориентировочно на 20% образование оксидов азота в пламенной зоне. Кроме того, повышение концентрации кислорода на стадии дожига приводит, по закону действия масс, к росту констант скоростей реакций окисления в зоне горения, что позволяет сократить валовой выброс СО и НМЛОС на 35% и 70% соответственно. Суммарное снижение платы за выбросы из-за предотвращенного ущерба при применении предложенных горелочных устройств на филиалах ОАО «Генерирующая компания» составляет 0,589 млн. руб. (см. табл. 1 Приложения к Акту).

В расчетах затрат принято, что на стадии дожига используется 12 газогорелочных устройств со стоимостью каждого 15000 руб. Основные статьи капитальных вложений при переоборудовании 2 топок на ступенчатое и ярусное горение приведены в табл. 2 Приложения к Акту. Сумма капитальных вложений составляет 2,035 млн. руб. Срок окупаемости Т капитальных вложений за счет указанной экономии составляет 42 месяца.

Секретарь НТС ОАО «Генерирующая компания»



А.Д. Добронравов

ТАТАРСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
КАЗАН ШӘНӘРЕ
ЯҢА-САВИНОВ РАЙОНЫ



РЕСПУБЛИКА ТАТАРСТА
ГОРОД КАЗАН
НОВО-САВИНОВСКИЙ РАЙОН

ЖАВАПЛЫГЫ
ЧИКЛӘНГӘН
ШИРКӘТ

ООО «ТАТМАЗСЕРВИС»

ОБЩЕСТВО
С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

ООО «ТатМАЗсервис» Адрес: 420133 г.Казань ул.Гаврилова 10а, тел.: 5-212-444 р/с 40702810700000002403 в ТатЭкобанке г.Казани БИК 049209778
к/с 3010181030000000778 в Приволжском РКЦ г.Казани, БИК 049209000 ИНН 1656001553, код по ОКОНХ 71500, код по ОКПО 27831462

№ 37

“21” 05 2009 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Наименование предложения: проект газоснабжения двух котельных ООО «ТатМАЗсервис» для отопления административно-производственного здания автоцентра по адресу: г. Казань, ул. Гаврилова, 10а

Основные характеристики внедрения.

Проект газоснабжения двух котельных ООО «ТатМАЗсервис» для отопления административно-производственного здания автоцентра по адресу: г. Казань, ул. Гаврилова, 10а (исполнитель Сафин Р.Р.) принят к внедрению.

Основание: положительное заключение госэкспертизы «Газоснабжение двух котельных ООО «ТатМАЗсервис» для отопления административно-производственного здания автоцентра по адресу: г.Казань, ул.Гаврилова, 10а» от 13.10.2008 №16-1-2-4755-08.

Суммарная мощность теплоисточников проектируемых производственных объектов 313,8 кВт. Прогнозируемая коммерческая эффективность после принятия объектов в эксплуатацию обеспечивает резервирование средств для минимизации рисков. Инвестиционной привлекательности предложения способствует комплексная оценка загрязнения атмосферы парниковыми газами. Она позволяет выявить уровень экологических рисков для предприятия с учетом существующего положения и прогнозируемых изменений тарифа на тепловую и электроэнергию, цены на топливо и других факторов, связанных с ужесточением нормативов по парниковым газам.

Директор ООО «ТатМАЗсервис»



И.И.Галияхметов

**Общество с ограниченной ответственностью
«СтройГазХолдинг»**

Р.Т., 420039, г. Казань.
Ул. Исаева, д.14
Тел.(843) 554-55-18

ОАО Банк «Казанский»
Р/с № 40702810500000004283
К/с № 30101810300000000806
БИК-049205806 ИНН-1658061981
ОКПО 76300978 КПП 165801001

Исх. № *088*

От *25 июля* 2009г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Наименование предложения: «Проект газоснабжения жилого комплекса г. Казани с производственными объектами и снижение выброса парниковых газов» (исполнитель – Гайдукова Т.С.) принят к внедрению при строительстве газопровода на территории промышленного объекта ЗАО «Акос АСТ Сервис» по ул. Горьковское шоссе, 49 г. Казань. Суммарная мощность теплоисточников проектируемого производственного объекта 840 кВт. Длина газопроводов 0,2 км. Примененная при проектировании временная методика позволила на основании комплексной гигиенической, экологической и энергетической оценки загрязнения атмосферы уточнить границы экологических рисков, связанных с парниковыми газами.

Директор ООО «СтройГазХолдинг» _____ Егоров В.Ю.



**Общество с ограниченной ответственностью
«Стройпроект»**

ОГРН 1021603272019, ИНН 1658044087/165801001,
ЛОСБ №6672 г. Казань ОСБ «Банк Татарстан» №8610
БИК 049205603 к/с 30101810600000000603 р/с 40702810462260102422
Адрес: г.Казань ул. Лазарева, 3 офис №15. Т. 554-55-18, 554-99-34.

Исх. № 21

От 19.06. 2009г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Наименование предложения: «Временная методика комплексной оценки загрязнения атмосферы выбросами парниковых газов от теплоисточников» внедрена при проектировании «Проект газоснабжения жилого комплекса г. Казани с производственными объектами и снижение выброса парниковых газов»

Основание: рекомендации Государственного доклада «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Республике Татарстан в 2007 г.» о практическом применении предлагаемого метода комплексной оценки. Суммарная мощность теплоисточников проектируемых производственных объектов 840 кВт.

Примененная при проектировании временная методика позволяет уточнить уровень экологических рисков, связанных с парниковыми газами. Это повышает качество проекта, т.к. в результате заказчику представляется возможность более объективного анализа проектных рисков и определения эффективности вложения средств в реализацию проекта.

Директор ООО «Стройпроект»



Волков С.А.



ЗАКАМЬЕ

Открытое акционерное общество

423820, Республика Татарстан,
г. Набережные Челны,
п. Сидоровка, д/я 31.

Телефоны: (8552) _____

Факс: (8552) _____

№ 178

от «04» 06 2010 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Наименование предложения: «Проект газоснабжения оптово-торговой базы ОАО "Закамье" в п.Сидоровка г. Набережные Челны РТ»

Основные характеристики внедрения.

Проект газоснабжения для отопления складских зданий на территории оптово-торговой базы ОАО «Закамье» по адресу: п.Сидоровка г. Набережные Челны РТ (исполнитель Кашапов Р.А.) принят к внедрению.

Основание:

— Заключение экспертизы промышленной безопасности, выполненное ООО «ИЦ ВСТ», утвержденное Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (РОСТЕХНАДЗОР) Приволжским Управлением Ростехнадзора от 15.12.2009г №30121/05.

Суммарная мощность теплоисточников проектируемых производственных объектов составляет 3.3МВт.

Прогнозируемая коммерческая эффективность после принятия объектов в эксплуатацию обеспечивает резервирование средств для минимизации рисков.

Представленная в проекте комплексная оценка ущерба загрязнения атмосферы парниковыми газами, выполненная в соответствии с Климатической доктриной РФ (распоряжение Президента РФ от 17.12.2009 г. N 861-рп) и рекомендациями Госдоклада «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Республике Татарстан в 2007 г.», позволяет определить границы зоны инвестиционных рисков, связанных с экологическими факторами.

Генеральный директор



Р.М.Боязитов.

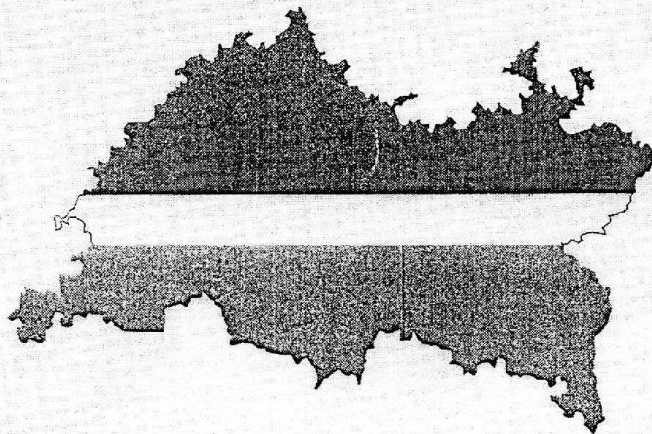
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА

УПРАВЛЕНИЕ РОСПОТРЕБНАДЗОРА
ПО РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН (ТАТАРСТАН)

ФГУЗ «ЦЕНТР ГИГИЕНЫ И ЭПИДЕМИОЛОГИИ
В РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН (ТАТАРСТАН)»

О САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ
В РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН
В 2007 ГОДУ

Государственный доклад



Казань
2008

О санитарно-эпидемиологической обстановке в Республике Татарстан в 2007 году

воздействия на человека, так как отсутствуют возможные переходы химических веществ, поступающих с выбросами изучаемого промрайона в источники водоснабжения. Водоемы, используемые для сброса отходов от промышленных предприятий, не используются в качестве источников хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Врачи ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Татарстан (Татарстан)», сотрудники кафедры гигиены, медицины труда КГМУ проводили исследования по оценке профессиональной онкологической заболеваемости на предприятиях машиностроительной отрасли. В ходе исследования проведена гигиеническая оценка условий труда, идентификация канцерогенных веществ, ретроспективный анализ смертности от раковых опухолей работников, занятых на производствах, связанных с использованием СОЖ при обработке металлических изделий, обоснованы профилактические мероприятия. Анализ результатов исследований воздуха рабочей зоны на содержание бенз(а)пирена выявил, что наиболее высокие концентрации наблюдаются на участке фрезерных станков с превышением ПДК и на участке станков с числовым программным управлением. Невысокий уровень загрязнения воздушной среды зарегистрирован в цехе заготовки металлических изделий, складских помещениях, где концентрация бенз(а)пирена составила от 0,00017 до 0,00019 мг/м³.

Выполнялись исследования по повышению санитарно-гигиенической эффективности систем обработки производственных выбросов и загрязнителей атмосферного воздуха городов. Численные исследования распространения выбросов в атмосфере на базе коммерческих пакетов программ, реализующих методы CFD (Computational Fluid Dynamics) проведены в КГМУ и КГАСУ (А.В.Иванов, М.Г. Зиганшин, А.М.Зиганшин) совместно с Пензенским государственным университетом архитектуры и строительства (А.И.Еремкин). В результате исследований получен приемлемый для практического применения комплексный показатель гигиенической, экологической и энергетической эффективности обработки выбросов.

В КГМА проводились научные исследования (Григорьев В.Е.) по оценке эффективности эпидемиологического надзора за больными хирургического профиля (Шайхразиева Н.Д.) на базе городской клинической больницы № 7, разработаны противоэпидемические мероприятия, алгоритм профилактики гнойно-воспалительных заболеваний, опубликованы 8 статей. Подготовлены и изданы методические рекомендации «Организация и проведение эпидемиологического надзора и противоэпидемических мероприятий в хирургическом стационаре» для врачей эпидемиологов, хирургов, бактериологов, защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук по специальности 14.00.30.

Выполнена работа «Эпидемиология заболеваемости урогенитальным герпесом в крупном промышленном городе» на базе республиканского кожно-венерологического диспансера МЗ РТ (Патяшина М.А.). Разработаны профилактические и противоэпидемические мероприятия, внедрение которых обеспечивает эффективный эпидемиологический надзор и контроль качества проведенных мероприятий. Впервые разработана система организации и проведения эпидемиологического надзора за урогенитальным герпесом в г.Казани для врачей различных специальностей. Опубликовано по данной теме 11 статей. 21 мая 2007г. защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук по специальности 14.00.30.

Исследования на тему «Проявление эпидемического процесса и совершенствование ЭН за ВИЧ инфекцией в РТ» (Фазулзянова И.М.) были направлены на изучение тенденции развития ВИЧ инфекции в РТ, развитие сочетанных форм ВИЧ, ХВГС, туберкулеза, которые чаще регистрируются среди молодых людей и

**МИНИСТЕРСТВО ЭКОЛОГИИ И ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН**



**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ДОКЛАД
О СОСТОЯНИИ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
И ОБ ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
В 2007 ГОДУ**

Казань – 2008

ных и попутных нефтяных пластовых вод для достижения соответствия их характеристик нормативам отведения в любые водные объекты без ущерба для их экологического состояния.

ИнЭПС АН РТ и Минэкологии и природных ресурсов РТ подведены итоги проведенных впервые в истории РТ крупномасштабных исследований загрязненности снежного покрова. Цель исследований предопределяла получение комплексной оценки влияния промышленных объектов на качество поверхностных вод, атмосферного воздуха и почв на территории РТ и восьми промышленных центров (гг. Альметьевск, Бугульма, Заинск, Зеленодольск, Казань, Лениногорск, Набережные Челны, Нижнекамск) в течение трех зимних сезонов 2005 – 2007 гг. В ходе исследований снежного покрова установлено, что экологическая обстановка в РТ и промышленных центрах, касающаяся загрязнения атмосферного воздуха и почв, оценивается в целом как удовлетворительная, однако загрязненность снеговых стоков с территорий промышленных центров превышает предельно допустимые значения в 10 – 20 раз.

Определенный вклад внесен учеными КГМУ, КГМА совместно со специалистами Управления Роспотребнадзора по РТ и ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в РТ» в изучение загрязненности атмосферного воздуха городских и сельских поселений, идентификации факторов риска и их влияния на здоровье населения гг. Казань, Нижнекамск, Альметьевск. Осуществляется работа по гигиенической оценке автотранспорта как источника загрязнения атмосферного воздуха, с подготовкой предложений по переходу на экологические стандарты Евро-3 и Евро-4.

Учеными КГАСУ и КГМУ разработан и испытан экономически и технически доступный способ комплексной очистки галогенсодержащих выбросов ЗВ в атмосферу, предусматривающий их хемосорбционную, термическую и конденсационную обработку со степенью обезвреживания не ниже 98%, что соответствует современным требованиям, предъявляемым к подобным выбросам, особенно в связи с началом выполнения Россией в 2008 г. международных обязательств по Киотскому протоколу.

Учеными КГЭУ выполнены оценки выброса парниковых газов и величины их стока в древесные насаждения. Прогнозы выбросов до 2020 г., составленные по сценариям «реалистичный» и «инновационный», позволяют планировать мероприятия по выполнению требований Киотского протокола на территории РТ.

Важные результаты получены учеными КГФЭИ по тематике «Разработка концепции методологических основ эколого-экономической оценки качества жизни», посвященных изучению сущности многоаспектной категории «качество жизни».

Целью исследований специалистов ФЦТРБ-ВНИВИ являлся мониторинг объектов природной среды, кормов и продуктов питания на содержание токсикантов техногенного и природного происхождения. На основе проведенных исследований разработаны карты распространения тяжелых металлов и микотоксинов в регионах Татарстана, а также рабочие электронные варианты карт загрязнения токсичными элементами и микотоксинами в Республиках Татарстан, Башкортостан, Марий Эл, Ульяновской области, микотоксинами – в южных, западных, центральных и некоторых других регионах РФ.

Разработан сорбент микотоксинов (фитосорб), не уступающий зарубежным аналогам (микосорб, микофикс и др.), проведено изучение параметров его безопасности – эмбриотоксичность, тератогенность, мутагенность, влияние на состояние животных при длительном применении с изучением гематологических, биохимических, иммунологических и гистологических показателей.

В КГАВМ были продолжены работы по изучению содержания радиоактивных веществ (РВ) в объектах ветеринарного надзора, определению количеств РВ, поступивших в пастбищный, стойловый периоды и за год в организм коров, и расчету коэффициентов перехода РВ из рациона животных в продукцию животноводства – молоко и мясо крупного рогатого скота. Установлено, что радиационный фон на территории РТ в 2007 г. находился в пределах 7,2–14,6 мкР/час, что соответствует естественному радиационному фону Поволжского региона и средней полосы Европейской части России.

Развитие научно-технических исследований в области инженерной экологии проводилось в 2007 г. ТО РЭА (совместно с НПЭЦ «Экоцентр») на базе кафедры общей химии и экологии КГТУ им. А. Н. Туполева по таким направлениям, как:

- пиролиз ТБПО в «сверхадиабатическом» режиме;
- повышение эффективности работы локальных и биологических очистных сооружений на предприятии ОАО «Казаньоргсинтез»;
- физико-математическое моделирование аэро- и гидротехнологических процессов загрязнения устья р. Казанка с проведением реального экомониторинга;
- разработка тестов для экспресс-анализа токсикантов широкого спектра.

В КГТУ–КХТИ в рамках выполнения НИР по теме «Разработка научных основ и технологий по реабилитации окружающей природной среды» разработана технология выделения серы из сточных вод производства тиокола на Казанском заводе синтетического каучука.

