

На правах рукописи

А.А.А.

ФАРАХОВА АЛЬБИНА ИЛЬГИЗЯРОВНА

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ И
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ЖИДКОСТЕЙ ОТ
ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ НА ТЭС И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

05.14.14 - Тепловые электрические станции, их энергетические системы и
агрегаты

05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Казань - 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Технология воды и топлива»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лаптев Анатолий Григорьевич

Официальные оппоненты: **Шарапов Владимир Иванович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный
технический университет», заведующий
кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Федяев Владимир Леонидович
доктор технических наук, старший научный
сотрудник,
ФГБУН Институт механики и
машиностроения Казанского научного центра
Российской академии наук (ИММ КазНЦ
РАН), заведующий лабораторией
«Моделирование технологических процессов»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный
энергетический университет им. В.И. Ленина»,
г. Иваново

Защита состоится «26» декабря 2013 г. в 16 час 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.082.02 при ФГБОУ ВПО «Казанский
государственный энергетический университет» по адресу: 420066 г. Казань, ул.
Красносельская, д. 51, зал заседаний Диссертационного совета (Д-225).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО
«Казанский государственный энергетический университет».

С авторефератом можно ознакомиться на сайте ФГБОУ ВПО КГЭУ
www.kgeu.ru.

Автореферат разослан «22» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.082.02
кандидат химических наук, профессор

 Э.Р. Зверева

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Процессы разделения дисперсных смесей (осаждением, фильтрованием, центрифугированием и другими методами) являются составной частью производств в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, угольной промышленности, водоподготовки и водоочистки на ТЭС. Теплоэнергетика и нефтехимия - отрасли, вносящие существенный вклад в загрязнение природной среды. Степень вреда сточных вод тепловых электростанций для окружающей среды зависит от многих факторов, главный из которых — химический состав сбрасываемых сточных вод. Наиболее опасными для природных водоемов считаются сбросы, содержащие масло- и нефтепродукты. Для этих загрязнителей предусматриваются жесткие нормативы по остаточным концентрациям, что требует серьезного отношения к технологиям очистки сточных вод.

Очистка сточных вод от нефтепродуктов, как правило, сопряжена с известными трудностями, обусловленными тем, что часть нефтепродуктов находится в эмульгированном состоянии. Поэтому актуальной задачей является разработка теоретических подходов к расчету аппаратов разделения дисперсных сред, выбор аппаратного оформления и повышения эффективности водоподготовки и очистки сточных вод ТЭС, а также промышленных предприятий нефтехимии.

Цель: разработать математическую модель и технические решения по аппаратному исполнению устройств, модернизации технологических схем для повышения эффективности очистки сточных вод ТЭС от нефтепродуктов, а также модернизации отстойников на предприятиях химической технологии.

Задачи исследования:

- разработать математическую модель турбулентного переноса тонкодисперсной фазы в жидкостях для расчета эффективности сепарации;
- разработать конструкцию и выполнить расчет тонкослойного отстойника с коагулятором;
- разработать варианты модернизации технологических схем очистки сточных вод ТЭС от нефтепродуктов и повысить эффективность процесса;
- разработать варианты модернизации отстойников в химической технологии на промышленных предприятиях.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- разработана математическая модель и получены расчетные уравнения для определения эффективности физической коагуляции мелких капель (<100 мкм) на поверхности неупорядоченных контактных элементов (насадок) в отстойнике. Уравнения получены для двух случаев:
 - динамическая вязкость капель больше вязкости сплошной фазы;
 - вязкость капель меньше вязкости сплошной среды.
- для расчета процесса сепарации мелких капель нефтепродуктов из сточных вод ТЭС на пластины тонкослойных отстойников получены уравнения для определения коэффициентов переноса. Используются модели пограничного слоя Прандтля, Кармана, Дайслера и Ханратти, теория массопередачи и

гидродинамическая аналогия. Показано согласование результатов расчета по данным моделям.

- по полученным уравнениям математических моделей выполнены расчеты эффективности очистки сточных вод ТЭС от нефтепродуктов и очистки широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) от свободной воды. Показано влияние конструктивных и режимных характеристик тонкослойного отстойника с насадочным коагулятором на эффективность очистки.

- с применением теории турбулентной миграции тонкодисперсных частиц получено выражение для расчета эффективности разделения эмульсий и суспензий в гидроциклоне. Показано согласование результатов расчета с известными экспериментальными данными.

Практическая значимость:

- разработан алгоритм расчета эффективности разделения эмульсий в тонкослойном отстойнике с коагулятором для решения задачи очистки сточных вод ТЭС от нефтепродуктов, очистки ШФЛУ от воды и циркуляционной воды от дисперсных частиц охлаждения пирогаза.

- разработан алгоритм расчета для определения эффективности гидроциклона при разделении тонкодисперсной фазы.

- предложена и запатентована конструкция тонкослойного отстойника с насадочным коагулятором, которая обеспечивает степень очистки 99%.

- разработанная конструкция тонкослойного отстойника получила промышленное внедрение на ряде объектов (ОАО «АРТИКГАЗ», ОАО «НОРДГАЗ», ООО Новатэк-Юрхаровнефтегаз), а также использована при модернизации отстойника технологической схемы узла охлаждения пирогаза в производстве этилена на ОАО «Казаньоргсинтез».

- повышена эффективность очистки сточных вод от нефтепродуктов технологических схем на Казанской ТЭЦ-1 и Казанской ТЭЦ-3 за счет внедрения в схему тонкослойного отстойника с коагулятором. Повышена эффективность очистки циркуляционной воды на узле охлаждения пирогаза.

- экономическая эффективность решений для Казанской ТЭЦ-1 составляет: по первому варианту модернизации 842800 руб./год, по второму варианту модернизации - 222200 руб./год.

Личный вклад автора:

- используя уравнения из теории массопередачи и турбулентного пограничного слоя, получены выражения коэффициентов скорости переноса частиц в жидкостях и эффективности сепарации;

- на основе применения миграционной теории переноса тонкодисперсной фазы и энергетической модели, с использованием известных уравнений из массопередачи, разработана математическая модель физической коагуляции капель в эмульсиях на поверхности хаотичной насадки;

- получены выражения для расчета скорости турбулентной миграции капель и эффективности их осаждения на поверхность неупорядоченных насадочных элементов;

- разработана конструкция горизонтального цилиндрического отстойника с коагулятором и варианты модернизации технологических схем очистки сточных вод ТЭС.

- выполнены расчеты промышленных отстойников в нефтехимии.

Автор защищает:

- математическую модель для определения эффективности турбулентной сепарации мелкодисперсной фазы в тонкослойном отстойнике и гидроциклоне;

- конструкцию, математическую модель и результаты расчета тонкослойного цилиндрического отстойника с коагулятором;

- варианты модернизации существующей технологической схемы очистки сточных вод ТЭС от нефтепродуктов и модернизации отстойников на промышленных предприятиях.

Апробация работы и научные публикации.

По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, из них 5 статей в журналах из перечня ВАК РФ и один патент на полезную модель. Основные положения работы докладывались и обсуждались на: Международных молодежных научных конференциях «Тинчуринские чтения», Казань: КГЭУ, 2011, 2012, 2013; Городской научно-практической конференции, посвященной 45-летию г. Нижнекамска «Энергоэффективная и энергосберегающая политика в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве», Нижнекамск, 2011; II Международной практической межотраслевой конференции «Химические решения для водооборотных систем промышленных предприятий», Казань, 2011; Международной научно-технической конференции «Энергетика, информатика, инновации-2011», Смоленск, 2011; Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях», ММТТ-24, Саратов, 2011; ММТТ-26, Нижний Новгород, 2013; Восемнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2012; VII ежегодной Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования - 2012», Санкт-Петербург, 2012; VIII школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», Казань: КНИТУ им. А.Н. Туполева, 2012; VI международной научно-практической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности», Ульяновск, 2013; Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» - XVII Бенардосовские чтения, Иваново, 2013.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 165 источников и приложений. Объем диссертации составляет 156 страниц, из них 141 страница текста, 35 рисунков, 14 таблиц, 5 приложений на 15 страницах, справки о внедрении.

Содержание работы

Во введении отмечается актуальность работы, формулируются цель и задачи исследования, отмечается научная новизна и практическая значимость.

В первой главе выполнен обзор, посвященный проблеме очистки сточных вод ТЭС и промышленных предприятий от нефтепродуктов. Дана классификация нефтесодержащих сточных вод, образующихся на ТЭС и промышленных предприятиях, а также основные методы их очистки. Рассмотрен метод очистки сточных вод отстаиванием. Приведен порядок расчета тонкослойного отстойника. Кратко описана модель многоскоростного континуума.

Во второй главе для расчета процессов выделения нефтепродуктов из воды на ТЭС и промышленных предприятиях рассмотрены два режима движения жидкости с дисперсной фазой: ламинарный в отстойниках и турбулентный в каналах тонкослойных отстойников и гидроциклонах.

Для определения эффективности сепарации контактного устройства приведено уравнение конвективного массопереноса частиц. Для плоскопараллельного канала оно имеет вид:

$$u_y \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_d \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\beta_d C_\infty F}{V}, \quad (1)$$

где y - поперечная координата к стенке канала, м; z - продольная координата (в направлении движения жидкости), м; D_d - коэффициент турбулентной диффузии частиц, м²/с; β_d - скорость турбулентной миграции, м/с; C_∞ - концентрация частиц в ядре потока, принимается средней по поперечному сечению, кг/м³; F - площадь контакта жидкости со стенками канала, м²; V - рабочий объем контактного устройства, м³;

Если длина канала L значительно больше диаметра d и число Пекле структуры потока $Pe = u_{cp} L / D_n > 10$, где u_{cp} - средняя скорость жидкости, м/с; D_n - коэффициент перемешивания, м²/с, можно допустить малый вклад перемешивания и тогда уравнение (1) получит вид модели идеального вытеснения в направлении движения жидкости:

$$u_{cp} \frac{dC}{dz} = \frac{\beta_d C_\infty F}{V}. \quad (2)$$

Основной задачей в рассматриваемой выше постановке является определение коэффициента переноса частиц β_d . Для его определения использован подход, когда турбулентное осаждение мелкодисперсной фазы рассматривается как разновидность диффузионного процесса с использованием обычных уравнений из теории массопередачи и пограничного слоя.

Скорость миграции β_d характеризует интенсивность осаждения частиц из турбулентного потока на стену канала $\beta_d = j / C$ или $j = \beta_d C_\infty$, где j - удельный поток частиц к стенке, кг/(м²с).

Для очень малых частиц (где индекс инерционности $\omega_E \tau_p \ll 1$) их движение практически ничем не отличается от движения несущих турбулентных вихрей

среды и тогда $D_d = D_T$, где D_d, D_T – коэффициенты турбулентной диффузии частиц и среды, $\text{м}^2/\text{с}$, ω_E – угловая частота турбулентных низкочастотных пульсаций энергоемких вихрей, с^{-1} , τ_p – время релаксации частицы, с .

Удельный поток частиц по аналогии с первым законом Фика записан в виде:

$$j = -(D_d + D_{\delta p}) \frac{dC}{dy}, \quad (3)$$

где $D_{\delta p}$ – коэффициент броуновской диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

Сопротивление переносу частиц в пристенном слое с учетом броуновской и турбулентной диффузии:

$$\frac{1}{\beta_d} = \int_0^{\delta} \frac{j^* dy}{D_{\delta p} + D_d}, \quad (4)$$

где δ – толщина турбулентного пограничного слоя, м ; j^* – безразмерная плотность потока частиц.

Рассмотрены различные модели турбулентности.

Согласно двухслойной модели Прандтля коэффициент переноса частиц, полученный после интегрирования (4), определяется по выражению:

$$\beta_d = \frac{u_*}{(1 + \omega_E \tau_p) \left[R_1 S c_{\delta p} + \frac{1}{\chi} \ln \left(\frac{R_\delta}{R_1} \right) \right]}, \quad (5)$$

где u_* – динамическая скорость трения на стенке, $\text{м}/\text{с}$; $R_1 = \frac{u_* \delta_1}{\nu_{ж}}$ – безразмерная толщина вязкого подслоя (в модели Прандтля $R_1 = 11,6$); δ_1 – толщина вязкого подслоя, м ; $\nu_{ж}$ – кинематическая вязкость жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$; $\chi = 0,4$ – константа Прандтля; $R_\delta = \frac{u_* \delta}{\nu_{ж}}$ – безразмерная толщина турбулентного пограничного слоя; $S c_{\delta p} = \frac{\nu_{ж}}{D_{\delta p}}$ – число Шмидта для частиц.

Безразмерная толщина вязкого подслоя на шероховатой поверхности будет отличаться от $R_1 = 11,6$ на гладкой пластине. Для пограничного слоя с различными возмущениями (шероховатость, двухфазность и т.п.) в работах Дьяконова С.Г. и др. получено:

$$R_{1m} = 11,6 \sqrt{\frac{C_{f0}}{C_{fm}}}, \quad (6)$$

где C_{f0}, C_{fm} – коэффициенты трения для гладкой пластины и шероховатой, соответственно.

С функциями турбулентной вязкости $D_T(y)$ из трехслойной модели Кармана, получено выражение для определения коэффициента переноса частиц:

$$\beta_d = \frac{u_*}{5(1 + \omega_E \tau_p) \left[Sc_{\delta p} + \ln 6 + 0,5 \ln \left(\frac{R_\delta}{30} \right) \right]}. \quad (7)$$

Используя функции $v_T(y)$ Дайслера и Ханратти и гидродинамическую аналогию Чилтона-Кольборна, следует:

$$\beta_d = \frac{u_*}{(1 + \omega_E \tau_p) Sc_{\delta p}^{2/3} [5,309 + 2,5 \ln(R_\delta)]}. \quad (8)$$

Если рассматривать перенос только в турбулентной области, пренебрегая переносом в вязком подслое, с функцией Прандтля $v_T = \chi u_* y$ и соотношением $D_d = D_T / (1 + \omega_E \tau_p)$ имеем:

$$\beta_d = \frac{\chi u_*}{(1 + \omega_E \tau_p) \ln(R_\delta / R_1)}. \quad (9)$$

Динамическая скорость в выражениях (5), (7)–(9) определяется по уравнению:

$$u_* = u_{cp} \sqrt{C_{fm} (1 + 2,5 C_\infty) / 2}. \quad (10)$$

Эффективность турбулентного осаждения после интегрирования (2):

$$\eta_t = \frac{c_H - c_K}{c_H} = 1 - \exp\left(-\frac{4\beta_d}{d_s} t_{cp}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{4L\beta_d}{d_s W_{жс}}\right), \quad (11)$$

где d_s – эквивалентный диаметр канала, м; $t_{cp} \approx L / u_{cp}$ – среднее время пребывания потока, с, L – длина пластин, м.

В данной главе также показан пример использования математической модели для расчета эффективности разделения тонкодисперсной фазы в гидроциклоне и дано сравнение с экспериментальными данными.

Динамическая скорость связана со средней диссипацией энергии $\bar{\varepsilon}$ следующей формулой:

$$u_* = \left(\frac{11,6 \chi \bar{\varepsilon} \nu}{\rho_{жс}} \right)^{0,25}, \quad (12)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Delta p S u_{вх}}{V_{жс}}, \quad (13)$$

где Δp – гидравлическое сопротивление гидроциклона, Н/м²; S – площадь входного патрубка, м²; $u_{вх}$ – скорость потока во входном патрубке, м/с; $V_{жс}$ – объем жидкости в гидроциклоне, м³.

Выражение для определения коэффициента турбулентного переноса частиц после интегрирования (4) с функцией Адельшина $v_T = 0,0112 \bar{V}_t r$, где r – радиус, получено в форме:

$$\beta_d = \left(\frac{R_1}{u_*} + \frac{(1 + \omega_E \tau_p) \ln(R_\infty / R_1)}{0,0112 \cdot \bar{V}_t} \right)^{-1} = \frac{0,0112 \cdot \bar{V}_t u_* / (1 + \omega_E \tau_p)}{R_1 0,0112 \cdot \bar{V}_t / (1 + \omega_E \tau_p) + u_* \ln(R_\infty / R_1)}, \quad (14)$$

где $R_\infty = u_* R / \nu$ – безразмерная координата, так как при расчете учитывается турбулентный перенос по всему радиусу гидроциклона R ; \bar{V}_t – окружная скорость жидкости, м/с.

В частном случае с учетом толщины слоя осевших частиц на стенке гидроциклона уравнение (14) принимает вид (при $R_1 > R_{oc}$):

$$\beta_d = \frac{0,0112 \cdot \bar{V}_t u_* / (1 + \omega_E \tau_p)}{(R_1 - R_{oc}) 0,112 \cdot \bar{V}_t / (1 + \omega_E \tau_p) + u_* \ln(R_\infty / R_1)}, \quad (15)$$

где $R_{oc} = u_* h_{oc} / \nu$ – безразмерная толщина слоя осевшей дисперсной фазы; h_{oc} – толщина осевшего слоя частиц, м.

Показано согласование расчетов по уравнениям (11) и (15) с известными экспериментальными данными Мустафаева А.М.

В третьей главе рассмотрено устройство горизонтального цилиндрического тонкослойного отстойника «Инжехим» и на его основе для повышения эффективности разделения тонкодисперсных эмульсий разработана конструкция горизонтального цилиндрического тонкослойного отстойника с насадочным коагулятором, который представлен на рис. 1.

Для расчета эффективности и выбора конструктивных характеристик насадочного коагулятора разработана математическая модель.

Выражение для расчета эффективности коагуляции имеет вид:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\beta_d S a_v H}{Q}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{\beta_d a_v H}{\varepsilon_{ce} u_{cp}}\right), \quad (16)$$

где S – площадь поперечного сечения насадочного слоя, м²; a_v – удельная поверхность насадки, м²/м³; H – длина насадочного слоя, м; Q – объемный расход, м³/с; u_{cp} – средняя скорость жидкости, м/с; ε_{ce} – удельный свободный объем насадки, м³/м³.

Для тонкодисперсной фазы $\beta_d = \gamma$, где γ – коэффициент переноса импульса.

Коэффициент переноса импульса γ находится путем интегрирования выражения:

$$\gamma = \left[\int_0^\delta \frac{\tau^*(y) dy}{\nu + \nu_T(y)} \right]^{-1}, \quad (17)$$

где $\tau^*(y) = \tau(y) / \tau_{cm}$ – относительный поток импульса; τ_{cm} – поток импульса (касательное напряжение трения) на стенке, Па.

Рассмотрены два случая:

1. Вязкость дисперсной фазы больше или равна вязкости сплошной ($\mu_d \geq \mu_c$). В этом случае образовавшаяся пленка жидкости на поверхности контактных устройств может рассматриваться как твердая шероховатая стенка, и закон затухания турбулентных пульсаций в пограничном слое на разделе фаз как известно имеет вид $\nu_T(y) \sim y^{3+4}$.

2. Вязкость дисперсной фазы меньше сплошной ($\mu_d < \mu_c$) и закон затухания: $v_T(y) \sim y^2$ (по данным Левича и др.).

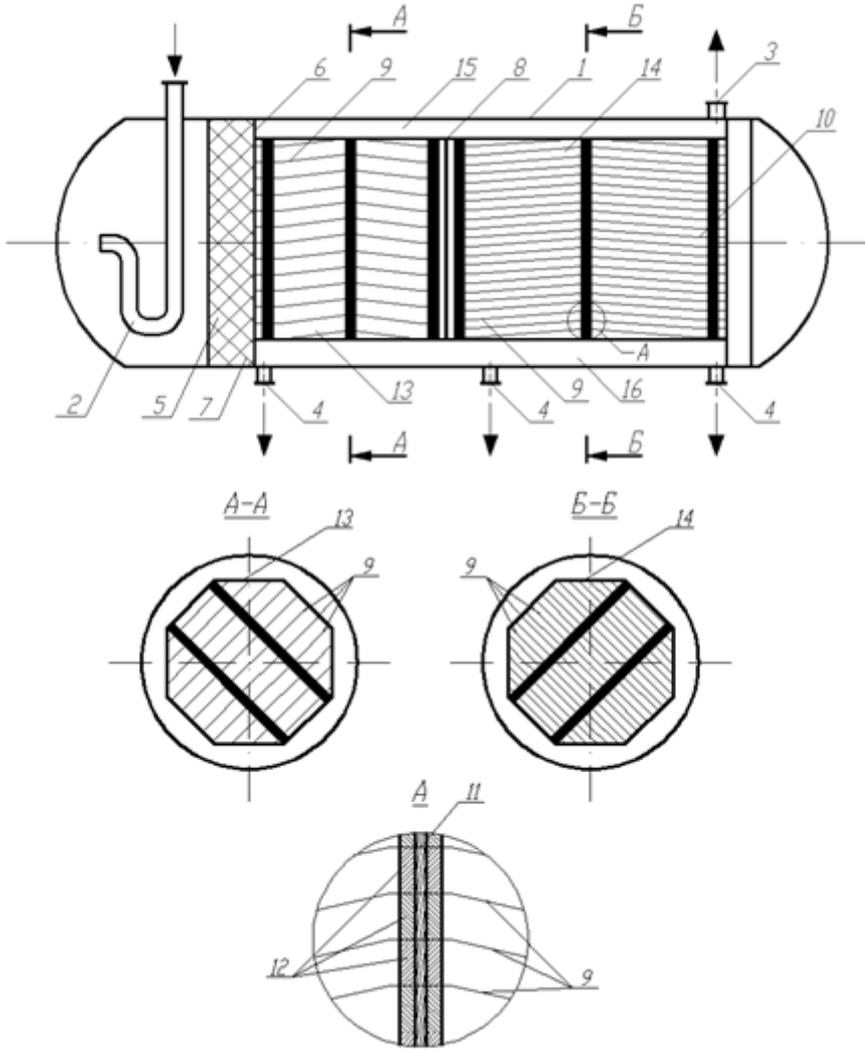


Рис.1 Горизонтальный цилиндрический отстойник с коагулятором
 1 – корпус,
 2 – подводящий трубопровод,
 3, 4 – патрубки вывода продуктов разделения,
 5 – коагулятор,
 6 – каркас, 7 – секция нерегулярных насадок,
 8 – разделительное устройство,
 9 – продольные наклонные пластины,
 10 – секция пластин,
 11 – стержни,
 12 – дистанционные элементы, 13 – зона турбулентного осаждения, 14 – зона ламинарного осаждения

В первом случае если в выражении (17) использовать функции турбулентного обмена, справедливые для пограничного слоя на стенке в виде:

$$\frac{v_T}{v_{жс}} = 0,01\chi^4(y^+)^4, \quad y^+ = \frac{u_*y}{v_{жс}} < 5; \quad (18)$$

$$\frac{v_T}{v_{жс}} = 0,2y^+ - 0,959, \quad 5 < y^+ < 30; \quad (19)$$

$$\frac{v_T}{v_{жс}} = 0,4y^+ - 1, \quad y^+ > 30, \quad (20)$$

то после интегрирования (17) получен коэффициент переноса импульса:

$$\gamma = \frac{u_*}{5,309 + 2,5 \ln(R_\delta)}. \quad (21)$$

Для двухфазных сред с подвижной поверхностью раздела можно воспользоваться функцией $v_T(y)$ Левича для вязкого подслоя в двухслойной модели:

$$v_T \approx u_* \delta_1 (y/\delta_1)^2. \quad (22)$$

Или с точностью до коэффициента пропорциональности из (22) получим:

$$v_T = \varepsilon R_1 v_{жс} (y^+/R_1)^2. \quad (23)$$

Предполагая, что за пределами вязкого подслоя (т.е. $R_1 \leq y^+ \leq R_\delta$) функция турбулентной вязкости записывается по модели Прандтля и Кармана имеем:

$$v_T = \chi u_* y, \quad (24)$$

или

$$v_T = \chi v_{жс} y^+. \quad (25)$$

Тогда из сопряжения функций (23) и (25) на границе вязкого подслоя ($y^+ = R_1$) получим значение $\varepsilon = \chi$.

После интегрирования (17) с функциями $v_T(y)$ в вязком подслое (23) и в турбулентной области (25) получим:

$$\gamma = u_* \left[\frac{\arctg \sqrt{\chi R_1}}{\sqrt{\chi/R_1}} + \frac{\ln(R_\delta/R_1)}{\chi} \right]^{-1}. \quad (26)$$

Выражения для γ (21) и (26) можно использовать для расчета турбулентной миграции, если частицы очень малы и в силу этого их движение практически ничем не отличаются от несущих их вихрей ($\omega_E \tau_p \ll 1$). Тогда имеет место равенство $D_d = v_T$. Для более крупных частиц рекомендуется выражение:

$$D_d = D_T / (1 + \omega_E \tau_p). \quad (27)$$

После интегрирования выражения (17) с функциями (18) – (20) и (23), (25), (27) следует:

$$\beta_d = \gamma / (1 + \omega_E \tau_p). \quad (28)$$

Основными параметрами полученных уравнений являются динамическая скорость и значения R_1 и R_δ .

Выражение для динамической скорости в насадочном слое получено в работе Лаптева А.Г. и др. в виде:

$$u_* = 1,8 \left(\frac{\xi u_{cp}^3 v_{жс}}{2d_\delta} \right)^{1/4} = 1,8 \frac{Re_\delta^{0,75} v_{жс}}{d_\delta} \left(\frac{\xi}{2} \right)^{1/4}, \quad (29)$$

где $\xi = f(Re_\delta)$ - коэффициент гидравлического сопротивления насадки; $Re_\delta = u_{cp} d_\delta / v_{жс}$ - число Рейнольдса; $d_\delta = 4\varepsilon_{св} / a_V$ - эквивалентный диаметр насадки.

Безразмерная толщина вязкого подслоя определяется по выражению (6).

Достоверное вычисление R_δ (или δ) в насадочном слое является достаточно сложной задачей. Приблизительно для стабилизированного течения принимают $R_\delta = 0,25 u_* d_\delta / v_{жс}$, т.е. $\delta \approx \varepsilon_{св} / a_V$ или $\delta_\delta = 0,25 d_\delta$.

Из выражений (16), (21), (28) для систем с $\mu_\delta \geq \mu_c$ получено выражение для расчета эффективности коагуляции на насадочном слое:

$$\eta = 1 - \exp \left[-6,04 \left(\frac{\xi}{\text{Re}_\omega} \right)^{0,25} \frac{H}{d_\omega (1 + \omega_E \tau_P) (5,309 + 2,5 \ln R_\delta)} \right]. \quad (30)$$

При $\mu_\delta < \mu_c$ имеем:

$$\eta = 1 - \exp \left[-6,04 \left(\frac{\xi}{\text{Re}_\omega} \right)^{0,25} \frac{H}{d_\omega (1 + \omega_E \tau_P) k} \right], \quad (31)$$

где $k = \frac{\text{arctg} \sqrt{\chi R_1}}{\sqrt{\chi/R_1}} + \frac{\ln(R_\delta/R_1)}{\chi}$.

Показан пример удаления свободной воды из углеводородной смеси – широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) в нефтепереработке и нефтепродуктов из воды на ТЭС.

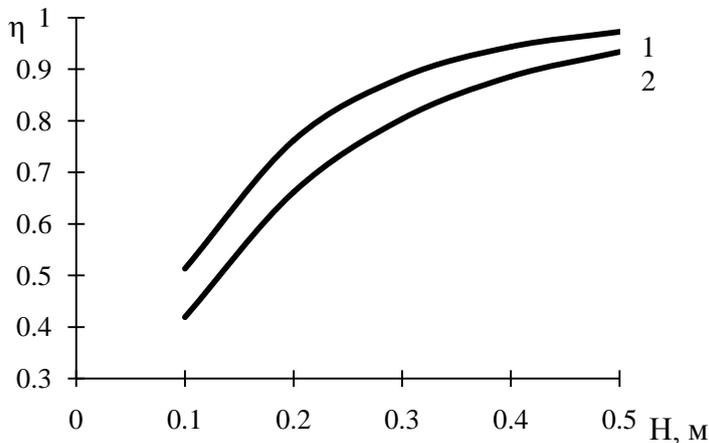


Рис. 2
Зависимость эффективности коагуляции капель нефтепродуктов в воде от длины насадочного слоя (насадка – кольца Рашига 25x25x3 мм)
1 - $\text{Re}_\omega = 500$;
2 - $\text{Re}_\omega = 1000$.

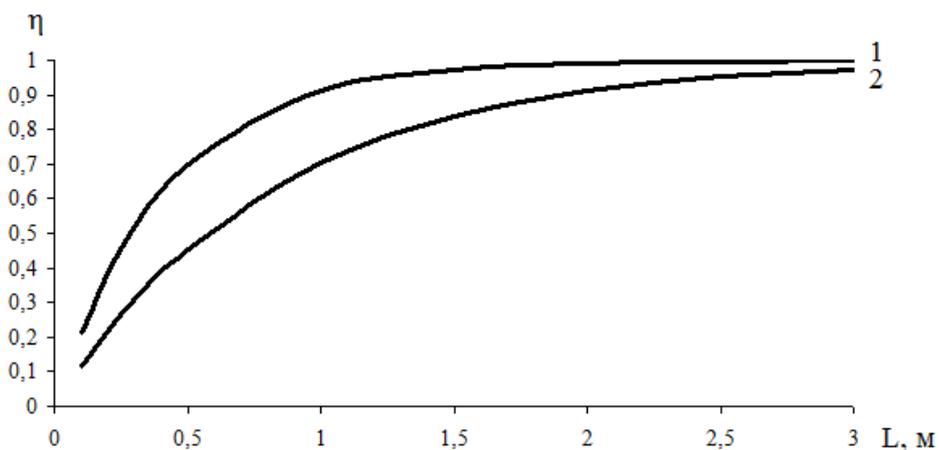


Рис. 3
Зависимость эффективности сепарации от длины пластин
1 – диаметр частиц $d_{ч} = 2,87 \cdot 10^{-4}$ м;
2 – диаметр частиц $d_{ч} = 2,87 \cdot 10^{-3}$ м

В четвертой главе рассмотрена существующая технологическая схема очистки сточных вод от нефтепродуктов на Казанских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-3. Предложены варианты их модернизации путем включения в схему

разработанного в третьей главе тонкослойного отстойника с коагулятором (рис. 4-7).

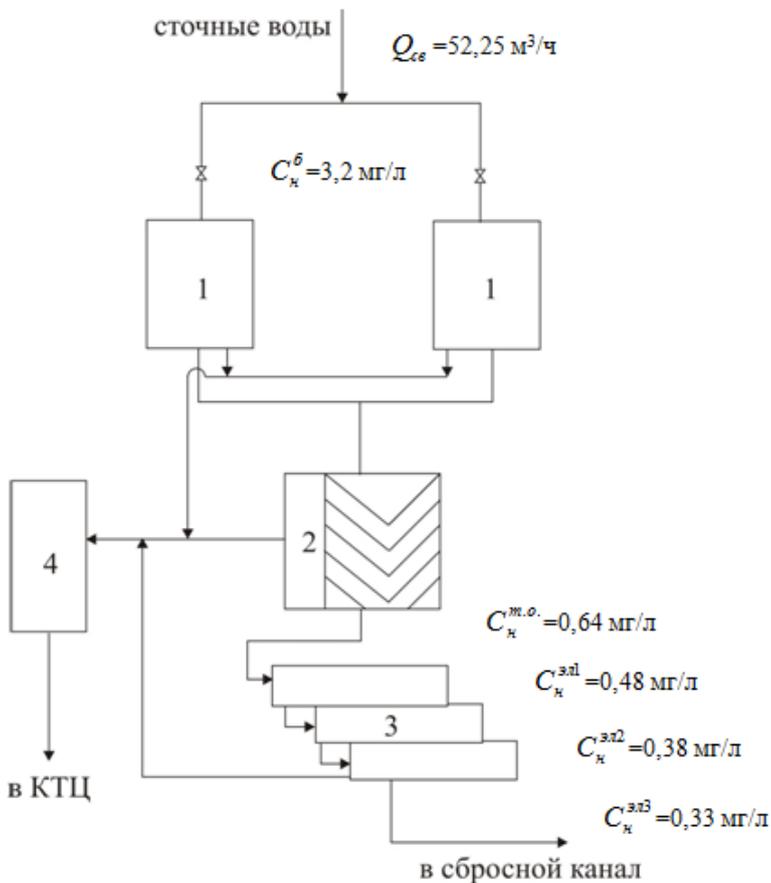


Рис.4 Первый вариант модернизации очистных сооружений

Казанской ТЭЦ-1:

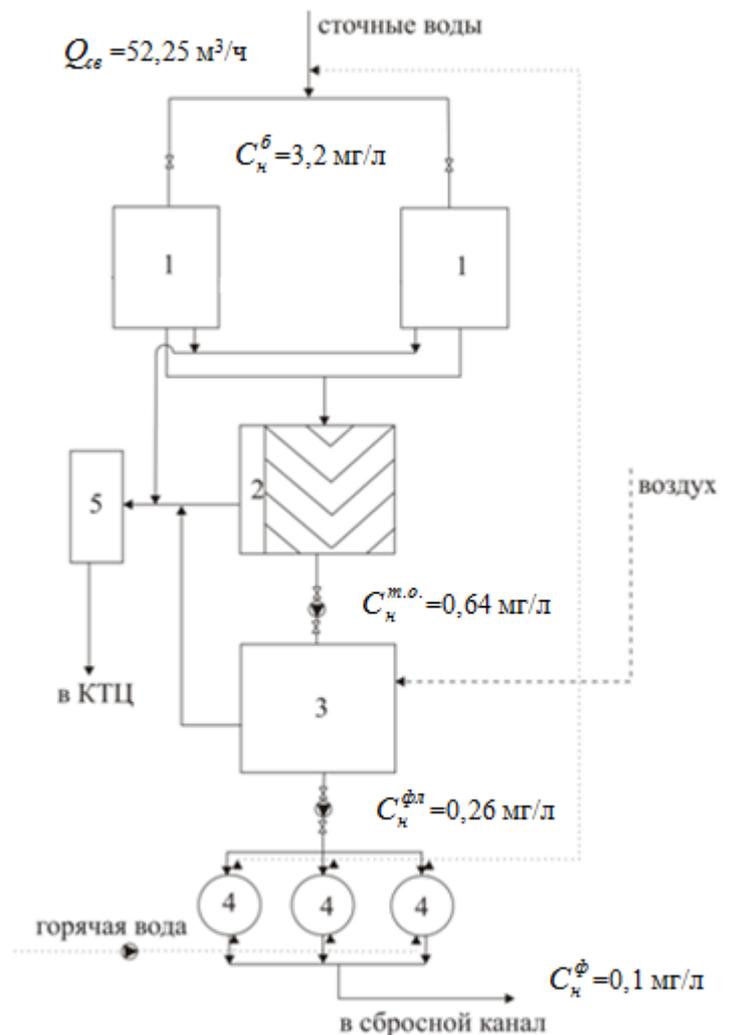
- 1 – приемный буферный бак, 2 – тонкослойный отстойник с коагулятором, 3 – 3-х ступенчатый электронейтрализатор, 4 – мазутоприемник

Предложена замена скребкового флотатора и механических фильтров доочистки на тонкослойный отстойник с коагулятором, а также из схемы исключаются насосы: подачи на механические фильтры, подачи на флотатор, промывки механических фильтров.

Рис.5 Второй вариант модернизации очистных сооружений Казанской ТЭЦ-1:

- 1 – приемный буферный бак, 2 – тонкослойный отстойник с коагулятором, 3 – флотатор, 4 – механический фильтр, загруженный антрацитом, 5 – мазутоприемник

После аккумулирующего бака сточные воды подаются в тонкослойный отстойник с коагулятором, затем очищаются во флотаторе и для доочистки направляются в механические фильтры, загруженные антрацитом. Из существующей схемы исключается электронейтрализатор.



Выполнены расчеты эффективности предложенных вариантов. Для Казанской ТЭЦ-1 по первому варианту модернизации она составит 842800 руб./год, по второму варианту модернизации - 222200 руб./год.

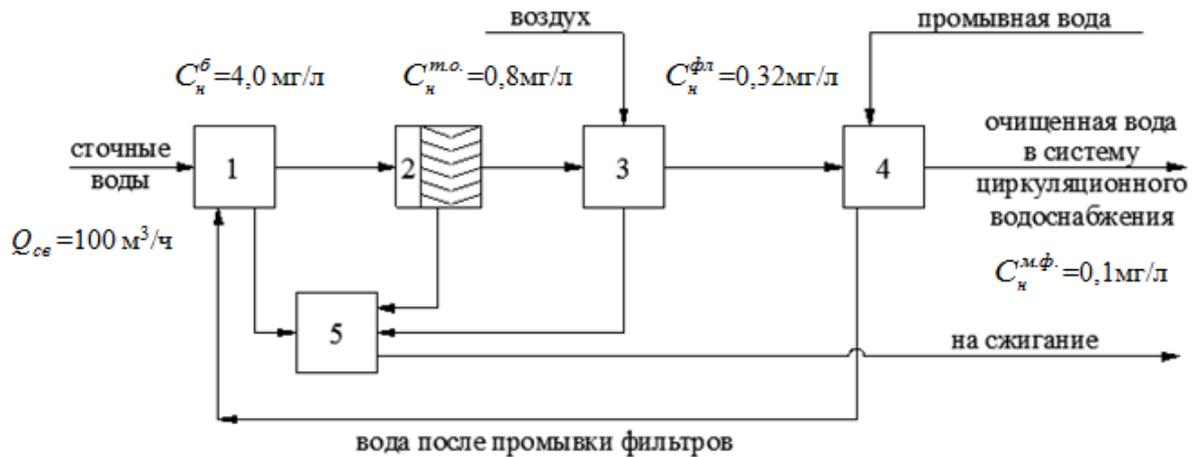


Рис. 6 Первый вариант модернизации очистных сооружений
Казанской ТЭЦ-3:

1 – буферная емкость; 2 – тонкослойный отстойник с коагулятором;
3 – флотатор; 4 – механический фильтр; 5 – бак сбора нефтепродуктов

По первому варианту модернизации из существующей схемы исключаются сорбционные фильтры, загруженные дорогостоящим древесным активированным углем.

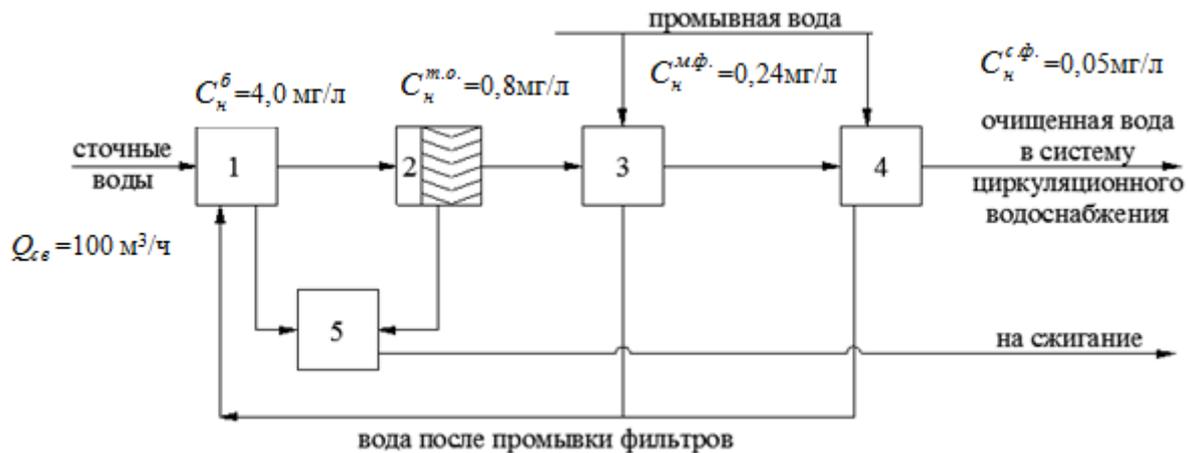


Рис.7 Второй вариант модернизации очистных сооружений
Казанской ТЭЦ-3:

1 – буферная емкость; 2 – тонкослойный отстойник с коагулятором;
3 – механический фильтр; 4 – сорбционный фильтр; 5 – бак сбора
нефтепродуктов

По второму варианту модернизации предложена замена напорного флотатора на тонкослойный отстойник с коагулятором.

Основные результаты и выводы:

Для повышения эффективности очистки сточных вод ТЭС и промышленных предприятий от нефтепродуктов разработаны научно-технические решения по аппаратному оформлению тонкослойного отстойника с насадочным

коагулятором и варианты модернизации технологических схем очистки на Казанских ТЭЦ-1 и ТЭЦ-3.

В качестве инструмента для решения данных задач разработана математическая модель турбулентной сепарации тонкодисперсной фазы (капель) в насадочном коагуляторе и на пластинах тонкослойного отстойника и в гидроциклоне.

Получены выражения для расчета скорости турбулентной миграции капель и эффективности очистки воды от нефтепродуктов. Математическая модель построена с использованием теории массопередачи и моделей турбулентного пограничного слоя. Параметры моделей находятся с применением средней скорости диссипации энергии, коэффициентов сопротивления и относительных потоков импульса. Показано согласование результатов расчета с известными экспериментальными данными.

Разработанные варианты модернизации технологических схем очистки сточных вод ТЭС с применением тонкослойных отстойников дают экономический эффект более 800 тыс. руб.

Выполнено внедрение разработанного отстойника на ряде предприятий нефтехимии.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Патент 125873 Россия, МПК В01D 21/02. Горизонтальный цилиндрический тонкослойный отстойник / Лаптев А.Г., Башаров М.М., Фарахова А.И., № 2012147087, заявл. 06.11.2012, опубл. 20.03.2013.

В изданиях из перечня ВАК РФ:

2. Лаптев А.Г. Математическое моделирование разделения тонкодисперсной фазы в гидроциклоне / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, А.И. Фарахова // **Вестник Казанского Технологического Университета**, 2012. – Т.15. – №24. – С. 132-134.

3. Лаптев А.Г. Определение эффективности турбулентной сепарации тонкодисперсной фазы в гидроциклоне / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, А.И. Фарахова // **Вода: химия и экология**, 2013. – №6. – С. 120-123.

4. Лаптев А.Г. Определение эффективности физической коагуляции тонкодисперсных эмульсий в насадочном слое при турбулентном режиме / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, А.И. Фарахова // **Теплоэнергетика**, 2013. – №9. – С. 62-67.

5. Лаптев А.Г. Эффективность турбулентной сепарации мелкодисперсной фазы в тонкослойных отстойниках / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, А.И. Фарахова // **Энергосбережение и водоподготовка**, 2011. – №5(73) – С. 43-46.

6. Лаптев А.Г. Явления турбулентного переноса тонкодисперсных частиц в жидкой фазе динамических сепараторов / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, А.И. Фарахова // **Научный журнал КубГАУ** [Электронный ресурс]. - Краснодар: КубГАУ, 2011. - №68 (04). – С. 1-31. Режим доступа: <http://www.ej.kubagro.ru/2011/04/pdf/43.pdf>.

В материалах конференций:

7. Башаров М.М. Модель турбулентного переноса дисперсной фазы в гидроциклоне / М.М. Башаров, А.И. Фарахова // Сб. тр. VIII школа–семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении». – Казань, КНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ, 2012. – С.270–273.

8. Башаров М.М. Конструирование тонкослойных отстойников / М.М. Башаров, А.И. Фарахова // Международная научно–техническая конференция «Энергетика, информатика, инновации–2011». – Смоленск, 2011. – Т. 2. – С. 19–21.

9. Башаров М.М. Математическая модель очистки жидкостей в гидроциклоне / М.М. Башаров, А.И. Фарахова // Восемнадцатая международная научно–техническая конференция

студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, 2012. – Т.4. – С. 163.

10. Башаров М.М. Повышение эффективности разделения эмульсий в отстойниках / М.М. Башаров, А.И.Фарахова // Сб. материалов юбилейной научно-практической конференции «Актуальные вопросы и перспективы развития ОАО «Казаньоргсинтез». – Казань, 2013. – С. 116-117.

11. Башаров М.М. Повышение эффективности удаления нефтепродуктов из сточных вод ТЭС / М.М. Башаров, А.И. Фарахова // Сб. тр. Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» – XVII Бенардосовские чтения. – Иваново, 2013. – Т.2. – С.91–93.

12. Башаров М.М. Расчет и модернизация динамических отстойников / М.М. Башаров, А.И. Фарахова // Городская научно-практическая конференция посвященная 45-летию г. Нижнекамска «Энергоэффективная и энергосберегающая политика в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве». – Нижнекамск, 2011. – С.6–9.

13. Башаров М.М. Эффективность турбулентной сепарации эмульсий в тонкослойных отстойниках / М.М. Башаров, А.И. Фарахова // VI-я Международная молодежная научная конференция «Гинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ, 2011. – Т.2. – С.128–129.

14. Лаптев А. Г. Физическая коагуляция тонкодисперсных эмульсий в насадочном слое / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, А.И. Фарахова // Сб. тр. VI международной научно-практической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». – Ульяновск, 2013. – С. 368–372.

15. Лаптев А.Г. Математическая модель турбулентного переноса мелкодисперсной фазы при осаждении в отстойниках / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, А.И. Фарахова // XXIV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях», ММТТ–24. – Саратов, 2011. Т.4. – С.59–61.

16. Лаптев А.Г. Математическое моделирование разделения тонкодисперсной фазы в гидроциклоне / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, А.И. Фарахова // Сб. тр. VII ежегодной Международной научно-практической конф. «Повышение эффективности энергетического оборудования – 2012». – Санкт-Петербург, 2012. – С. 856–862.

17. Лаптев А.Г. Эффективность турбулентной миграции мелкодисперсной фазы в тонкослойных отстойниках / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, А.И. Фарахова // II Международная практическая межотраслевая конференция «Химические решения для водооборотных систем промышленных предприятий». – Казань, 2011. – с. 42–46.

18. Лаптев А.Г. Эффективность физической коагуляции тонкодисперсных эмульсий в насадочном слое / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, А.И. Фарахова // Сб. тр. XXVI международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ–26». – Нижний Новгород, 27 – 30 мая, 2013.

19. Фарахова А.И. Определение эффективности коагуляции тонкодисперсных эмульсий в насадочном слое / А.И. Фарахова, А.Г. Лаптев, М.М. Башаров // Сб. тр. VIII ежегодной Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения». – Казань, 2013. – С.104–105.

20. Фарахова А.И. Повышение эффективности тонкослойных отстойников / А.И. Фарахова // Сб. тр VII-й Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ, 2012. – Т.2. – С.154.

Подписано в печать 21.11.2013 г.

Форм. бум. 60x84 1/16. Печ. л. 1. Тираж 100. Заказ № 414.

Отпечатано в ООО «Отечество»

420126, г. Казань, ул. Чистопольская, д. 27а