

На правах рукописи



ДОЛГОВ АНТОН НИКОЛАЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ
ДЕАЭРАТОРОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

**05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лаптев Анатолий Григорьевич

Официальные оппоненты: **Тутубалина Валерия Павловна**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», профессор
кафедры «Тепловые электрические станции»

Теляков Эдуард Шархиевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», профессор кафедры
«Машины и аппараты химической промышленности»

Ведущая организация: ООО Инженерный центр «Энергопрогресс»

Защита состоится 13 декабря 2012 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.02 при ФГБОУ ВПО ГОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066 г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, зал заседаний Ученого совета (Д-223).

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

Автореферат разослан «9» ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.082.02
кандидат химических наук, профессор



Э.Р. Зверева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Значительной проблемой теплоэнергетики является неудовлетворительная работа установок для термической деаэрации питательной воды на ТЭС. Практика показывает, что срок службы оборудования водоподготовки, питаемых водой с большой концентрацией агрессивных газов, значительно сокращается. Известны случаи, когда трубы тепловых сетей приходилось менять через полтора – два года работы из-за интенсивной внутренней коррозии. Выход из строя тепловой сети, замены труб и оборудования связаны с большими затратами.

Деаэраторы и декарбонизаторы предотвращают коррозию труб, радиаторов и котельного оборудования. Они являются незаменимым оборудованием в промышленных и бытовых системах водоподготовки. Различают деаэраторы: сопловые, насадочные, пленочные, струйные, барботажные и комбинированные.

По принципу действия деаэрация бывает: термическая, десорбционная или химическая, вакуумная и др. Из них наиболее распространен случай термической деаэрации, характеризующийся как преимуществами: возможностью работы при пониженных параметрах теплоносителей, что существенно повышает энергетическую эффективность теплоснабжения; так и недостатками – повышенными энергозатратами.

Проведенные исследования режимов работы деаэратора ДСА-300 Казанской ТЭЦ-3 показали, что деаэратор не всегда обеспечивает требуемое содержание кислорода O_2 на выходе при различных режимах и необходима его модернизация.

Одним из методов ресурсосбережения и снижения энергозатрат при процессе термической деаэрации может быть разработка новых конструкций деаэраторов или модернизация действующих.

В последние годы в практике отечественных и зарубежных предприятий сложилась устойчивая тенденция к замене устаревших контактных элементов (барботажных тарелок, насадок и т.п.) преимущественно в вакуумных и атмосферных колоннах на модернизированные или вновь разработанные виды насадок, обладающих более широким интервалом устойчивой работы и большей эффективностью.

Насадочные колонны находят широкое применение в промышленности при проведении процессов абсорбции, ректификации и жидкостной экстракции. К достоинствам насадочных колонн можно отнести высокую эффективность и широкий интервал устойчивой работы, сравнительно невысокую стоимость и простоту конструкций.

Объект исследования. Действующий термический атмосферный деаэратор на ТЭС, а именно:

-деаэратор ДСА-300 ОАО «ТГК-16» Казанской ТЭЦ-3.

Цель работы – модернизация деаэраторов на ТЭС с целью повышения эффективности процесса удаления коррозионно-активных газов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд взаимосвязанных задач, среди которых можно выделить наиболее значимые:

а) разработка математической модели процессов массо- и теплопереноса в насадочных колоннах (деаэраторах), обобщение результатов моделирования;

б) исследование и анализ режимов работы, а так же конструктивных характеристик деаэраторов на ТЭС;

в) выбор контактных устройств, расчеты и технические решения по модернизации термических деаэраторов ДСА;

г) натуральные тепловые испытания модернизированного деаэратора ДСА-300 Казанской ТЭЦ-3 после его модернизации;

д) анализ экономической эффективности модернизации атмосферного деаэратора на примере Казанской ТЭЦ-3.

Научная новизна.

1. На основе применения однопараметрической диффузионной модели структуры потоков разработана математическая модель термической деаэрации воды в неупорядоченном насадочном слое. Система уравнений записана для жидкой и газовой фаз, и массопередача учитывается с помощью объемных источников.

2. Выполнен учет влияния на массопередачу в насадке тепловых эффектов при деаэрации кислорода из воды паром. Показано, что тепловые эффекты снижают эффективность массопередачи на 15-20 % и, следовательно, их необходимо учитывать в расчетах деаэраторов.

3. Получена обобщающая зависимость для расчета концентрации растворенного газа в жидкости по высоте аппарата при процессах дегазации в неупорядоченном насадочном слое.

Практическая значимость работы.

Исследованы режимы работы деаэратора ДСА-300 Казанской ТЭЦ-3. Выполнены расчеты и разработаны технические решения по модернизации термического деаэратора.

В декабре 2011 года на Казанской ТЭЦ-3 была проведена модернизация действующего деаэратора ДСА-300, которая заключается в замене устаревших контактных устройств в колонке деаэратора на неупорядоченную насадку номинального размера 60 мм «Инжехим».

Получено, что после модернизации, при максимально-возможной нагрузке содержание кислорода O_2 в деаэрированной воде снизилось в 1,5-2 раза.

Личный вклад автора заключается в разработке математической модели, проведении расчетов, математической обработке, анализе и обобщении полученных результатов, разработке технических решений по модернизации.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечивается натуральной проверкой предложенных научно-технических решений в составе действующего оборудования ТЭС. Достоверность численных расчетов подтверждается путем сравнения с известными экспериментальными данными.

Автор защищает.

1. Разработанную математическую модель, учитывающую влияние теплопередачи на массопередачу при деаэрации.

2. Полученную зависимость для определения концентрации компонента в жидкости по высоте аппарата при процессах дегазации.

3. Результаты расчетов и технические решения по модернизации деаэраторов с различными контактными устройствами.

4. Конструкцию и результаты натуральных исследований модернизированного деаэратора ДСА-300 Казанской ТЭЦ-3.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследования диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: IV молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2009 г.); XXIII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (г. Саратов, 2010 г.); конференции посвященной к «Дню энергетика» (г. Казань, 2010 г.); XVII международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2011 г.); VI молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2011 г.); городской научно-практической конференции, посвященной 45-летию г. Нижнекамска (г. Нижнекамск, 2011г.); международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию филиала ГОУ ВПО «МЭИ(ТУ)» в г. Смоленске (г. Смоленск, 2011 г.); II международной практической межотраслевой конференции «Химические решения для водооборотных систем промышленных предприятий» (г. Казань, 2011 г.); VI международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (Иваново, 2011 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ (3 статьи в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России, глава в монографии, 9 тезисов и докладов).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 109 страницах, включающих 19 рисунков, 18 таблиц, 106 наименований в списке использованной литературы, двух приложений о внедрении результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе отмечается одна из основных проблем в системах водоподготовки - коррозия. Рассмотрены основные типы и конструкции деаэрационных установок. Отмечено, что значительный вклад в развитие методов расчета и совершенствование конструкций деаэраторов внесли Шарапов В.И., Оликер И.И., Пермяков В.А., Труб И.А., Кондратьев А.Д. и др. Сделан вывод: модернизация тепло- и массообменных аппаратов с использованием высокоэффективных контактных устройств является все более актуальным направлением в различных отраслях промышленности и энергетике.

Во второй главе приводятся основные подходы математического моделирования промышленных аппаратов и разработана модель деаэрации в насадочном слое.

Задачей модернизации колонн является выбор типа насадки, ее геометрических размеров и высоты слоя (количество секций) в аппарате при заданном качестве разделения и производительности.

В качестве первого приближения первоначально рассмотрен расчет насадочного деаэратора, обеспечивающего необходимое качество деаэрации, по модели идеального вытеснения.

Модель идеального вытеснения предполагает поршневое движение потоков в аппарате (без перемешивания). В этом случае совместное решение уравнений материального баланса и массопередачи позволяет вычислить высоту насадки при заданной степени извлечения в виде:

$$H = h_{\text{ор}} n_{\text{ор}}, \quad (1)$$

где H – высота слоя насадки, м; $h_{\text{ор}}$, $n_{\text{ор}}$ – высота и число единиц переноса.

Рассмотрены насадочные деаэраторы с кольцами Рашига, кольцами Палля, насадкой «Инжехим», с заданными характеристиками: расход жидкости, $L = 170$ т/час; концентрация кислорода O_2 на входе в аппарат, $X_{\text{н}} = 100$ мкг/л. Промежуточные данные и технические характеристики полученных аппаратов с использованием различных насадок приведены в табл. 1.

Таблица 1. Конструктивные характеристики деаэратора и основные величины

№	Величина	«Инжехим»	Кольца Рашига	Кольца Палля
1	Диаметр колонны, м, (D_k)	1,0	1,2	1,0
2	Рабочая скорость газа, м/с, (W)	2,36	1,64	2,36
3	Коэффициент массопередачи, м/с, ($K_{\text{ор}}$)	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,76 \cdot 10^{-4}$	$0,84 \cdot 10^{-4}$
4	Высота слоя насадки, м, (H)	1,23	1,39	1,55
5	Поверхность массопередачи, м^2 , (F)	318,5	423,1	381,7

В результате анализа полученных результатов сделаны следующие выводы:

1) насадка «Инжехим» при одинаковой удельной поверхности по сравнению с другими насадками обеспечивает меньшую концентрацию компонента на выходе из аппарата, при одинаковой высоте слоя (т.е. большую эффективность);

2) степень извлечения компонента с насадкой «Инжехим» обеспечивается при меньшем перепаде давления в 2-3 раза.

Следовательно, нерегулярная насадка «Инжехим» является современной альтернативой кольцам Рашига и другим аналогичным насадкам. При равной высоте слоя она обеспечивает большую производительность, меньшее гидравлическое сопротивление и более высокое качество разделения смесей.

В реальных аппаратах всегда существует обратное (продольное) перемешивание потоков, что уменьшает эффективность разделения. В качестве второго приближения в диссертации сделан расчет с учетом продольного перемешивания, используя решение системы уравнений однопараметрической диффузионной модели структуры потоков.

Уравнения однопараметрической модели, записанные для газовой и жидкой фаз имеют вид:

$$\begin{cases} W_{\text{г}} \frac{dC_{\text{г}}}{dz} = D_{\text{пг}} \frac{d^2 C_{\text{г}}}{dz^2} - R_{\text{г}}, \\ W_{\text{ж}} \frac{dC_{\text{ж}}}{dz} = D_{\text{пж}} \frac{d^2 C_{\text{ж}}}{dz^2} + R_{\text{ж}}, \end{cases} \quad (2)$$

где W_{Γ} , $W_{\text{ж}}$ - средние скорости газа и жидкости, м/с; C_{Γ} , $C_{\text{ж}}$ - концентрации компонента в газовой и жидкой фазах; $D_{\text{пг}}$, $D_{\text{пж}}$ - коэффициенты продольного перемешивания в жидкой и газовой фазах, м²/с; $R_{\text{ж}}$, R_{Γ} - объемные источники массы в жидкой и газовой фазах; z - продольная координата (по высоте слоя).

Источники массы $R_{\text{ж}}$, R_{Γ} определяют количество массы перераспределяемого компонента, переходящее из одной фазы в другую в единице объема насадочного слоя, и имеют вид

$$R_{\Gamma} = K_{ox} a_v (C_{\Gamma} - C_{\Gamma}^*), \quad R_{\text{ж}} = K_{ox} a_v (C_{\text{ж}}^* - C_{\text{ж}}), \quad (3)$$

где C_{Γ}^* , $C_{\text{ж}}^*$ - равновесные концентрации компонента в газовой и жидкой фазах; a_v - удельная поверхность насадки, м²/м³.

Граничные условия на входе и выходе из аппарата записываются в виде:

$$\begin{cases} z = 0: & \frac{dC_{\text{ж}}}{dz} = 0, \quad W_{\Gamma} C_{\Gamma} + D_{\text{пг}} \frac{dC_{\Gamma}}{dz} = 0, \\ z = H: & \frac{dC_{\Gamma}}{dz} = 0, \quad -W_{\text{ж}} C_{\text{ж}} + D_{\text{пж}} \frac{dC_{\text{ж}}}{dz} = 0; \end{cases} \quad (4)$$

где H – высота насадки, м.

Коэффициенты перемешивания $D_{\text{п}}$ находится опытным путем для каждой конструкции аппарата. Результаты экспериментов часто обобщаются в виде безразмерного критерия Pe – числа Пекле от числа Рейнольдса:

$$Pe = \frac{Wl}{D_{\text{п}}} = f(Re), \quad (5)$$

где l – характерный размер аппарата, м; W – средняя скорость среды, м/с.

По данным Лаптева А.Г. и Фарахова М.И. результаты исследования структуры потока жидкости в слое насадки «Инжехим» обобщены известным критериальным уравнением:

$$Pe_{\text{ж}} = 2,348 Re_{\text{ж}}^{0,428}, \quad (6)$$

где $Pe_{\text{ж}} = q d_{\text{э}} / (D_{\text{п}} \varepsilon_{\text{св}})$; $Re_{\text{ж}} = 4q / (a_v \varepsilon_{\text{св}} \nu_{\text{ж}})$, $\nu_{\text{ж}}$ - коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с; $d_{\text{э}}$ - эквивалентный размер насадки, м; q - плотность орошения, м³/(м²·с); $\varepsilon_{\text{св}}$ - свободный объем насадки, м³/м³.

Продольное перемешивание по газовой фазе для нерегулярной насадки «Инжехим» описывается выражением:

$$Pe_{\Gamma} = 88,6 Re_{\Gamma}^{-0,67}, \quad (7)$$

где $Pe_{\Gamma} = W_{\Gamma} d_{\text{э}} / D_{\text{п}}$, $Re_{\Gamma} = W_{\Gamma} d_{\text{э}} / \nu_{\Gamma}$; W_{Γ} - скорость газа, м/с.

В результате решения системы уравнений (2) получена следующая зависимость концентрации O_2 в жидкой фазе по высоте аппарата в насадочном деаэраторе (рис. 1).

Для проверки математической модели были выполнены расчеты массообменных процессов. В качестве примера и для сравнения с экспериментальными данными рассмотрен насадочный дегазатор с кольцами Рашига 50x50 мм и насадкой «Инжехим» номинального размера 50 мм, с заданными начальными концентрациями. В качестве примера выполнен расчет дегазации SO_2 с использованием опытных данных Черткова Б.А.. Из рис. 2 видно

удовлетворительное согласование с экспериментальными данными и преимущество насадки «Инжехим».

Выполнен расчет массообменных процессов в насадочных дегазаторах с кольцами Рашига 25x25 мм и насадкой «Инжехим» номинального размера 24 мм, с заданными начальными концентрациями. Из рис. 3 видно преимущество насадки «Инжехим». В результате расчетов и сравнение с экспериментальными данными получено удовлетворительное ($\pm 10\%$) согласование с известными экспериментальными данными и подтверждена адекватность математической модели.

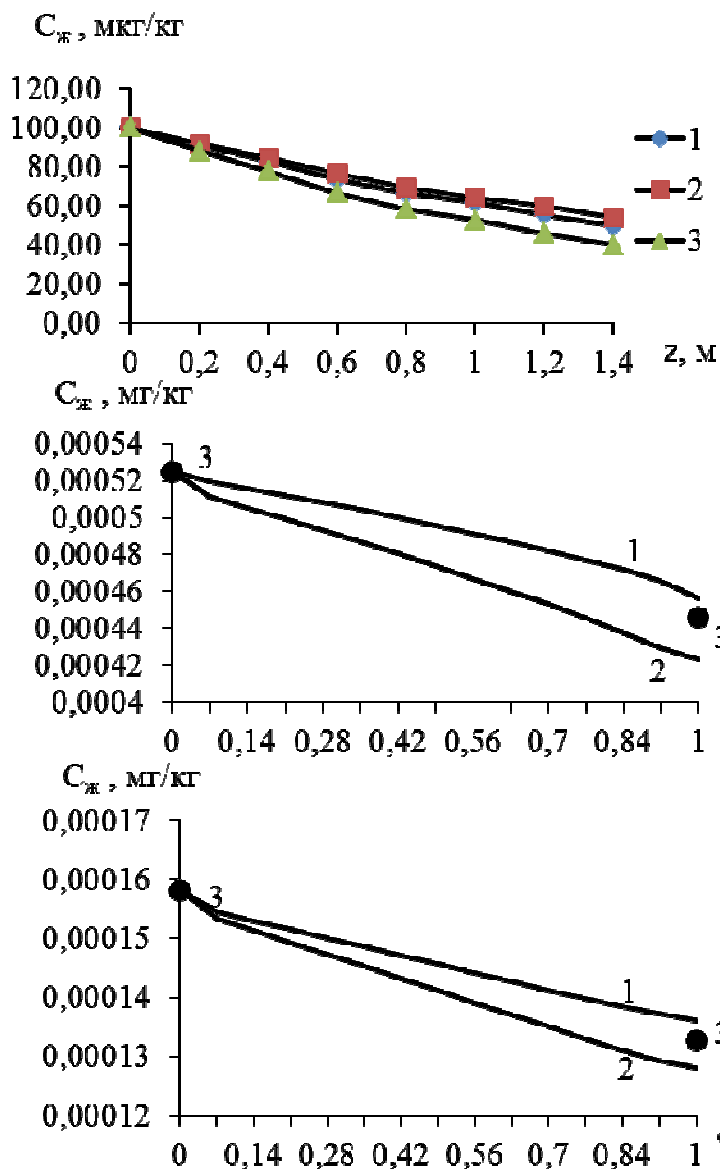


Рис. 1. Профиль концентрации O_2 в жидкой фазе в насадочном деаэраторе: 1 - с кольцами Рашига, 2 - с кольцами Палля, 3 - с насадками «Инжехим»

Рис. 2. Распределение поля концентраций в жидкой фазе по высоте колонны. Дегазация диоксида серы: 1 - кольца Рашига 50x50 мм, 2 - насадка «Инжехим» номинального размера 50 мм, 3 - экспериментальные данные для колец Рашига - Черткова Б.А.

Рис. 3. Распределение поля концентраций в жидкой фазе по высоте колонны. Дегазация диоксида серы: 1- кольца Рашига 25x25 мм, 2 - насадка «Инжехим» номинального размера 24 мм, 3 - экспериментальные данные для колец Рашига - Черткова Б.А.

На основе выполненных расчетов получено обобщенное решение, которое с достаточной точностью описывает зависимость концентрации компонента в жидкости по высоте аппарата при процессах дегазации. Данная зависимость аппроксимирует функцию концентрации при $40 < Pe_{ж} < 140$, $0,35 < Pe_{г} < 1,21$, $22 < h_{ог} < 42$, $0,0173 < n_{ог} < 0,0195$. Она имеет следующий вид:

$$X = \sum_{i=0}^6 X C_i \cdot z^i, \quad (8)$$

где $XC_0 = X_n$, X_n – концентрация растворенного газа в жидкости на входе в аппарат,

$$XC_i = a_{i,1} \cdot Pe_L + a_{i,2} \cdot Pe_G + a_{i,3} \cdot h_{or} + a_{i,4} \cdot n_{or}, \quad i = 1, 2, \dots, 6, \quad (9)$$

значение $a_{i,j}$ представлено в табл. 2.

Таблица 2. Значение коэффициентов $a_{i,j}$

i	$a_{i,1}$	$a_{i,2}$	$a_{i,3}$	$a_{i,4}$
1	$1,67 \cdot 10^{-8}$	$6,61 \cdot 10^{-7}$	$3,28 \cdot 10^{-8}$	-0,000245
2	$2,37 \cdot 10^{-7}$	0,0000177	$2,24 \cdot 10^{-7}$	-0,0017
3	$-1,83 \cdot 10^{-6}$	-0,000113	$-1,18 \cdot 10^{-6}$	0,012
4	$5,53 \cdot 10^{-6}$	0,000291	$1,63 \cdot 10^{-6}$	-0,0305
5	$-7,66 \cdot 10^{-6}$	-0,000346	$-9,95 \cdot 10^{-8}$	0,0359
6	$4,02 \cdot 10^{-6}$	0,00016	$-7,67 \cdot 10^{-7}$	-0,0164

В третьей главе выполнен учет влияния теплопередачи на массопередачу при деаэрации, используя подход Соломахи Г.П., Александрова И.А..

Количество тепла, переданное в результате теплоотдачи от поверхности раздела фаз через тепловой пограничный слой, составляет

$$J_T = \alpha_L (T_{G0} - T_{L0}), \quad (10)$$

где T_{G0} , T_{L0} – температура пара и жидкости, К; α_L – коэффициент теплоотдачи; или

$$J_T = \frac{\rho_\Gamma}{M_{\text{СМГ}}} k_T (C_\Gamma - C_{\Gamma,0}), \quad (11)$$

$$k_T = \alpha_L \beta Y M_{\text{СМГ}} / (\lambda_a \rho_\Gamma); \quad Y = C_{\Gamma,0}^* - C_{\text{ж},0}^*; \quad \beta = (T_{G0} - T_{L0}) / (C_\Gamma - C_{\Gamma,0}),$$

где $M_{\text{СМГ}}$ – молекулярная масса смеси газов, λ_a – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К); ρ_Γ – плотность газа, кг/м³; $C_{\text{ж}}$ и C_Γ – концентрация компонента в жидкой и газовой фазах, кг/кг; $C_{\Gamma,0}$ – концентрация компонента в газовой фазе на входе в аппарат, кг/кг; $C_{\text{ж},0}^*$ и $C_{\Gamma,0}^*$ – равновесные концентрации компонента в жидкой и газовой фазах на входе в аппарат, кг/кг.

Значения коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи в насадочном слое вычисляется по выражениям, полученным в работах Лаптева А.Г.

При выполнении практических расчетов коэффициент β можно определять в виде тангенса угла наклона секущих для кривых изобар

$$\beta \approx (T_{G0} - T_{L0}) / (C_\Gamma^* - C_\Gamma), \quad (12)$$

где C_Γ^* – равновесная концентрация компонента в газовой фазе, кг/кг.

Так как это не противоречит рассмотренной выше зависимости между разностью температур и концентраций компонента в паре и в тепловом пограничном слое. Значение Y без большой погрешности в расчете можно выразить через текущие значения концентраций компонентов в потоках:

$$Y = C_\Gamma^* - C_{\text{ж}}^*. \quad (13)$$

Система уравнений, определяющая диффузионную массопередачу, записывается следующим образом

$$\begin{cases} J = \frac{\rho_{\text{ж}}}{M_{\text{СМЖ}}} \beta_{\text{ж}} (C_{\text{ж}} - C_{\text{ж},0}) \\ J = \frac{\rho_{\text{г}}}{M_{\text{СМГ}}} \beta_{\text{г}} (C_{\text{г},0} - C_{\text{г}}) \end{cases} \quad (14)$$

Тогда основное уравнение массопередачи имеет вид

$$J = \frac{\rho_{\text{г}}}{M_{\text{СМГ}}} K_{\text{ог}} (C_{\text{г}}^* - C_{\text{г}}), \quad (15)$$

В результате совместного решения (10), (11), (14)-(15), получено выражение для общего коэффициента массопередачи

$$\frac{1}{K_{\text{ог}}} = \frac{1}{\beta_{\text{г}}} + \frac{\bar{m} \psi}{\beta_{\text{ж}}} + \frac{1}{k_{\text{г}}}, \quad (16)$$

где ψ находится из выражения

$$\psi = \frac{\rho_{\text{г}} M_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} M_{\text{г}}} \quad (17)$$

$M_{\text{ж}}$ и $M_{\text{г}}$ – молярная масса жидкости и газа, г/моль.

Выражение (16) устанавливает аддитивность сопротивлений массопередаче диффузионных и теплового пограничных слоев.

На основе применения рассмотренных выше выражений выполнен расчет деаэратора с учетом тепловых эффектов.

В качестве первого приближения выполнен расчет насадочного деаэратора, характеристики которого приведены в таблице 1, обеспечивающего необходимое качество деаэрации, по модели идеального вытеснения (табл. 3).

Таблица 3. Конструктивные характеристики деаэраторов и основные величины

№	Величина	«Инжехим»	Кольца Рашига	Кольца Палля
1	Рабочая скорость газа, м/с, (W)	2,36	1,64	2,36
2	Коэффициент массопередачи с учетом теплопередачи, м/с, ($K_{\text{ог}}$)	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$

Уточнено значение высоты слоя насадки, рассчитанное по модели идеального вытеснения, т.к. в реальных аппаратах всегда существует обратное (продольное) перемешивание потоков, что уменьшает эффективность разделения. В качестве второго приближения выполнен расчет с учетом продольного перемешивания, используя решение уравнения однопараметрической диффузионной модели структуры потоков.

В результате решения системы уравнений (2) получена следующая зависимость концентрации O_2 в жидкой фазе по высоте аппарата в насадочном деаэраторе (рис. 4).

Установлено, что конструктивные характеристики аппаратов (высота слоя насадки), полученные в результате расчета с учетом тепловых эффектов, на 15-20% больше, чем без учета.

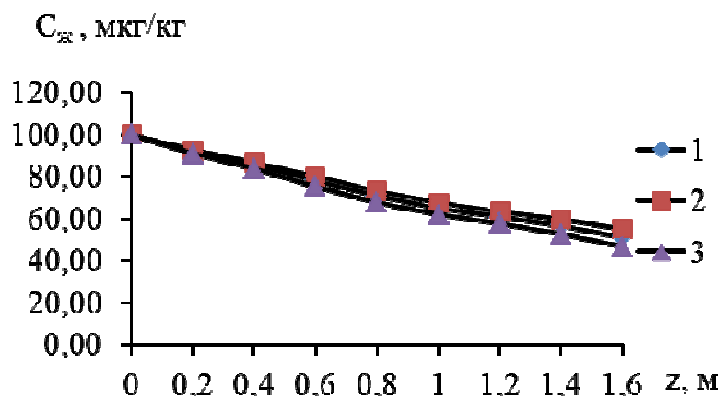


Рис. 4. Концентрация O_2 в жидкой фазе в насадочном деаэраторе: 1 - с кольцами Рашига, 2 - с кольцами Палля, 3 - с насадками «Инжехим»

Выводы:

- полученные конструктивные характеристики деаэраторов, вычисленные с учетом теплообменных процессов, дают более реальные представления о размерах аппаратов;

- насадка «Инжехим» при одинаковой удельной поверхности по сравнению с другими насадками обеспечивает меньшую концентрацию растворенных газов на выходе, при одинаковой высоте слоя.

- показано, что степень извлечения компонента с насадкой «Инжехим» обеспечивается при меньшем перепаде давления в 2-3 раза.

В четвертой главе приводится схема деаэрации на Казанской ТЭЦ-3, а так же технические характеристики, и краткое описание устройства деаэраторов низкого давления и подпитки теплосети.

Проведенные исследования режимов работы деаэратора ДСА-300 Казанской ТЭЦ-3 показали, что деаэратор не всегда обеспечивает требуемое содержание кислорода O_2 на выходе при различных режимах и необходима его модернизация. Характеристики работы по данным Казанской ТЭЦ-3 приведены в табл. 4.

Таблица 4. Характеристики работы деаэратора

Величина	Летний период	Весенний период	Зимний период
Расход жидкости, $L_{жид}$, т/ч	130	270	345
Расход пара, $G_{пар}$, т/ч	4,5	9,3	11,9
Температура жидкости на входе в аппарат, $t_{вх}$, °C	36	36	36
Температура жидкости на выходе из аппарата, $t_{вых}$, °C	100	100	100
Концентрация кислорода на входе в аппарат, O_2 вх, мкг/кг	>1000	>1000	>1000
Концентрация кислорода на выходе из аппарата, O_2 вых, мкг/кг	47,2	29,5	37
Нормируемая концентрация кислорода на выходе из аппарата, O_2 вых норм, мкг/кг	30	30	30

На основе выполненных расчетов разработаны технические решения по модернизации деаэратора, которые заключаются в замене устаревших контактных

устройств в колонке деаэрата на более эффективные. Для модернизации действующего деаэрата на Казанской ТЭЦ-3 были рассмотрены варианты с заменой контактных устройств на насадку «Инжехим» номинального размера 45 и 60 мм. В результате расчетов деаэрата при различных режимах получены следующие данные (табл. 5), и установлены деаэраты следующих размеров по высоте слоя насадки (табл. 6 и табл. 7).

Таблица 5. Данные полученные при расчетах деаэрата

№	Величина	«Инжехим» размером 45 мм при минимальном расходе	«Инжехим» размером 45 мм при максимальном расходе	«Инжехим» размером 60 мм при минимальном расходе	«Инжехим» размером 60 мм при максимальном расходе
1	Сопротивление сухого насадочного слоя, $\Delta P_{\text{сух}}$, Па/м	13,88	93,35	9,6	64,57
2	Сопротивление орошаемого насадочного слоя, $\Delta P_{\text{ор}}$, Па/м	22,72	235,79	15,72	163,1
3	Коэффициент массоотдачи в газе, $\beta_{\text{г}}$, м/с	0,013	0,021	0,012	0,019
4	Коэффициент массоотдачи в жидкости, $\beta_{\text{ж}}$, м/с	0,00016	0,00021	0,00018	0,00023
5	Коэффициент массопередачи, $K_{\text{ог}}$, м/с	0,00016	0,00021	0,00018	0,00023

Приведенные в табл. 6-7 результаты по высоте слоя насадки получены по модели идеального вытеснения (метод числа единиц переноса).

Таблица 6. Конструктивные характеристики деаэрата при минимальных расходах

№	Насадки	Диаметр колонны (м)	Высота насадки (м)
1	«Инжехим» размером 45 мм	2,0	0,7
2	«Инжехим» размером 60 мм	2,0	0,67

Для уточнения результатов с учетом реальной гидродинамической обстановки далее использована диффузионная модель (2), система дифференциальных уравнений записана в конечно-разностном виде и решена численными методами на ЭВМ. Решение системы дифференциальных уравнений с граничными условиями

позволило получить поле концентраций в жидкой (рис. 5) и газовой фазах по высоте колонны и дало возможность оценить высоту слоя насадки в деаэраторе с учетом перемешивания потоков.

Таблица 7. Конструктивные характеристики деаэратора при максимальных расходах

№	Насадки	Диаметр колонны (м)	Высота насадки (м)
1	«Инжехим» размером 45 мм	2,0	0,84
2	«Инжехим» размером 60 мм	2,0	0,89

На основе моделирования и проведенных расчетов массообменных процессов, предложена следующая схема модернизации деаэратора ДСА-300 (рис. 6).

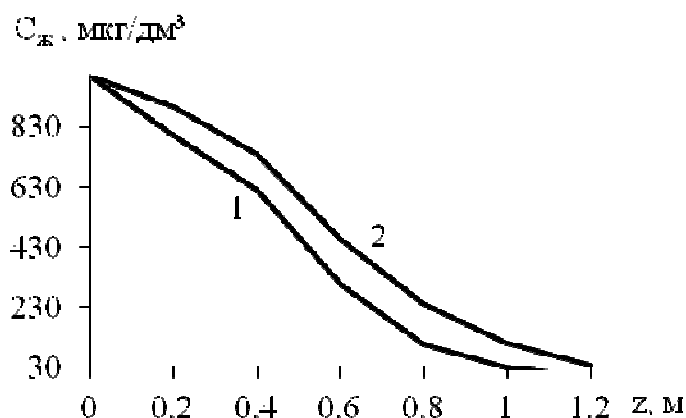


Рис. 5. Распределение поля концентраций кислорода в жидкой фазе по высоте колонны. Деаэрация воды: 1 - насадка «Инжехим» размером 45 мм, 2 - насадка «Инжехим» размером 60 мм

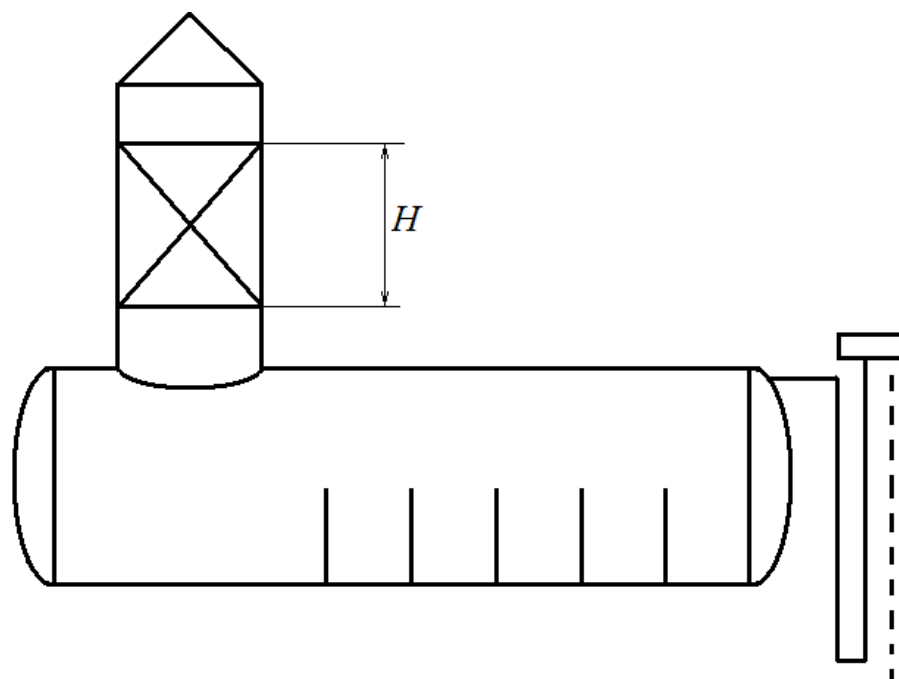


Рис. 6. Схема модернизации деаэратора ДСА-300 (вид сбоку). H – высота слоя насадки

В колонке деаэратора размещается насадка «Инжехим» размером 60 мм высотой $H = 1,3$ м (рис. 6). Это обеспечивает повышение эффективности удаления кислорода O_2 до требуемой нормы.

Для оценки эффективности работы модернизированного деаэратора ДСА-300 Казанской ТЭЦ-3 после его модернизации произведены натуральные испытания.

Основные результаты испытаний представлены в табл. 8. Испытания проводились при следующих расходах (нагрузках деаэратаора): 190 - 285 т/ч.

Анализ результатов испытания деаэратаора ДСА-300 позволяет сделать следующие выводы:

1. При максимально-возможной нагрузке содержание кислорода O_2 в деаэрированной воде на выходе из аппарата снизилось в 1,5-2 раза, что соответствует нормированному содержанию кислорода. Нагрев воды при этом соответствует рекомендуемому диапазону температур.

2. В результате проведенной модернизации улучшилась стабильность работы деаэратаора ДСА-300 при максимально возможных нагрузках.

3. Таким образом, результаты расчета на математической модели и эффективность насадки «Инжехим» подтверждены промышленной эксплуатацией аппарата.

Таблица 8. Результаты испытаний

Величина	Первое измерение	Второе измерение	Третье измерение
Расход жидкости, $L_{\text{жид}}$, т/ч	190	237	285
Расход пара, $G_{\text{пар}}$, т/ч	4,9	9,3	11,9
Температура жидкости на входе в аппарат, $t_{\text{вх}}$, °С	37,9	33	35,9
Температура жидкости на выходе из аппарата, $t_{\text{вых}}$, °С	99,6	98,8	97,6
Концентрация кислорода на входе в аппарат, O_2 вх, мкг/кг	>1000	>1000	>1000
Концентрация кислорода на выходе из аппарата, O_2 вых, мкг/кг	15	18	20
Нормируемая концентрация кислорода на выходе из аппарата, O_2 вых норм, мкг/кг	30	30	30

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ:

1. Проведено исследование и анализ режимов работы деаэратаоров на ТЭС. На примере деаэратаора ДСА-300 Казанской ТЭЦ-3, установлено, что деаэратаоры на ТЭС не всегда обеспечивают требуемое содержание кислорода O_2 на выходе при различных режимах. Недостаточная эффективность деаэратаоров зачастую связана с недостаточной поверхностью соприкосновения, малого времени контакта паровой и водяной сред.

2. Рассмотрены методы математического моделирования процессов массо- и теплопереноса в насадочных колоннах. Использован метод, который позволяет учитывать теплообменные процессы при расчете массообменных. Результаты расчета на математической модели подтверждены промышленной эксплуатацией аппарата.

3. На основе моделирования массообменных процессов и сравнения с экспериментальными данными получено обобщенное решение, которое позволяет рассчитывать концентрацию компонента в жидкой фазе.

4. Проведен расчет деаэратора на ТЭС, разработаны варианты модернизации атмосферных термических деаэраторов (конструкции ДСА-300) и произведена модернизация на Казанской ТЭЦ-3.

5. Выполнены натуральные тепловые испытания модернизированного деаэратора ДСА-300 Казанской ТЭЦ-3. Установлено, что при максимально-возможной нагрузке содержание кислорода O_2 в деаэрированной воде снизилось в 1,5-2 раза, что соответствует нормированному содержанию кислорода. Стабилизировалась работа деаэратора ДСА-300 при максимально возможных нагрузках.

6. Проведен экономический анализ модернизации деаэратора ДСА-300 Казанской ТЭЦ-3. Установлено, что срок окупаемости данного проекта составляет около 2-х лет.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. **Глава в монографии:** Лаптев, А.Г. Энерго- и ресурсосберегающие технологии и аппараты очистки жидкостей в нефтехимии и энергетике / А.Г. Лаптев, М.И. Фарахов, М.М. Башаров [и др.] / под ред. А.Г. Лаптева. – Казань.: Отечество, 2012. – 410 с. (Глава 7. Модернизация термических деаэраторов ТЭС (А.Г. Лаптев, А.Н. Долгов, М.М. Фарахов), с. 284-314)

В изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России

2. Лаптев, А.Г. Математическая модель термической деаэрации воды в насадочных колоннах / А.Г. Лаптев, А.Н. Долгов // электронное научно-техническое издание «Наука и Образование», 2011. – № 4. – С.1-10.

<http://technomag.edu.ru/doc/174163.html>

3. Лаптев, А.Г. Математическая модель очистки воды от растворенных газов в насадочных колоннах / А.Г. Лаптев, А.Н. Долгов // **Вода: химия и экология**, 2011, № 12. – С. 98-104.

4. Долгов А.Н. Математическая модель дегазации в насадочных аппаратах / А.Н. Долгов, А.Г. Лаптев // Известия вузов. – **Проблемы энергетики**, 2012. – № 5-6 – С. 79-85.

В материалах конференций:

5. Долгов, А.Н. Исследование барботажных контактных устройств для термических деаэраторов / А.Н. Долгов // IV-ая молод. науч. конф. «Тинчуринские чтения». – КГЭУ, Казань, 2009. – Т. 2. – С. 132.

6. Долгов, А.Н. Сравнительная характеристика термических деаэраторов // Математические методы в технике и технологиях – МММТ-23: Сб. трудов XXIII Межд. науч. конф. – Саратов, 2010. – Т. 11 – С. 40-41.

7. Долгов, А.Н. Расчет теплообменной эффективности насадочных колонн / А.Н. Долгов, А.Г. Лаптев // семинар, посвященный Дню энергетика и 40-летию образования КГЭУ: материалы докладов XII аспирант.-маг.семинара. – Казань, 2011. – Т. 1. – С. 209-210.

8. Долгов, А.Н. Расчет теплообменной эффективности насадочных колонн по диффузионной модели / А.Н. Долгов // XVII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". – МЭИ, Москва, 2011. – Т. 2 – С. 492-493.

9. Долгов, А.Н. Сравнительная характеристика эффективности термических деаэраторов / А.Н. Долгов // VI-ая молод. науч. конф. «Тинчуринские чтения». – КГЭУ, Казань, 2011. – Т. 2. – С. 133.

10. Силов, И.Ю. Определение эффективности насадочных термических деаэраторов / И.Ю. Силов, А.Н. Долгов // Городская научно-практическая конференция посвященная 45-летию г. Нижнекамска «Энергоэффективная и энергосберегающая политика промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве». – Нижнекамск, 2011. – С. 55-56.

11. Лаптев, А.Г. Модернизация деаэраторов на ТЭС /А.Г. Лаптев, А.Н. Долгов // II международная практическая межотраслевая конференция «Химические решения для водооборотных систем промышленных предприятий». – Казань, 2011. – С. 66-68.

12. Лаптев А.Г. Диффузионная модель дегазации в насадочных колоннах / А.Г. Лаптев, А.Н. Долгов // Международная научно-техническая конференции посвященная 50-летию филиала ГОУ ВПО «МЭИ(ТУ)» в г. Смоленске Энергетика, информатика, инновации-2011. – Смоленск, 2011. – Т. 2– С. 60-64.

13. Долгов, А.Н. Сравнительная характеристика эффективности деаэрации воды в насадочных колоннах / А.Н. Долгов, А.Г. Лаптев // VI Всероссийская научно-практическая конференция «Повышение эффективности энергетического оборудования». – Иваново, 2011. – С. 48-51.

Подписано к печати
Гарнитура «Times»
Тираж 100 экз.

11.10.2012г.
Вид печати РОМ
Усл. печ. л. 1
Заказ № 4499

Формат 60x84 / 16
Бумага офсетная.
Уч.-изд. л. 1.03.