

На правах рукописи



Карев Алексей Николаевич

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ И ЭКОЛОГИЧНОЙ
МОКРОЙ ОЧИСТКИ ВЫБРОСНЫХ ГАЗОВ В ПРОИЗВОДСТВАХ
ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЁГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», г. Москва
Тюрин Михаил Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры релейной защиты и автоматизации энергосистем (РЗиАЭ) ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва
Лачугин Владимир Федорович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Мосты, тоннели и строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г. Москва
Булаев Виктор Анатольевич

Ведущая организация: АО «Инновационный научно-производственный центр текстильной и легкой промышленности», г. Москва

Защита диссертации состоится 10 сентября 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.368.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)» по адресу: 119071, г. Москва, ул. Малая Калужская ул., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина» и на официальном сайте вуза www.rguk.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.368.02

Мезенцева Татьяна Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования определяется потребностью отечественной экономики удовлетворять нужды потребителей не за счет создания и ввода в эксплуатацию новых энергосистем, а за счет оптимизации и внедрения более рациональных экологических технологических схем, научиться обходиться существующими энергетическими системами. В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 19.04.2017 г. № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» целями государственной политики в сфере обеспечения экологической безопасности являются ликвидация накопленного вреда окружающей среде вследствие хозяйственной и иной деятельности в условиях возрастающей экономической активности и глобальных изменений климата. Одним из решений основных задач в области обеспечения экологической безопасности является внедрение инновационных и экологически чистых технологий, развитие экологически безопасных производств, а также развитие систем эффективного обращения с отходами производства и потребления, создание индустрии утилизации, в том числе повторного применения отходов производственных предприятий. Утилизация теплоты из очистных процессов предприятий текстильной и легкой промышленности открывает новые возможности для повышения эффективности и экологичности энергетических систем, снижая стоимость производства.

Степень научной разработанности проблемы. Существенный вклад в решение проблем оптимизации и разработки эффективных систем утилизации теплоты и очистки дымовых газов от вредных примесей внесли научные труды Аронова И.З, Бажана Е.П., Волковыского Е.Г., Лифшица О.В., Бурхольца Р, Кремера Р., Мизонова В.Е., Тамира А., Федосова С.В., Булыгина Ю.А., Соснина Ю.П., Сенько П.М., Свичара А.Е., Родионова А.И., в которых разработаны методологические основы совершенствования и создания новых энергосберегающих, экологически эффективных аппаратов, методов и технологий снижения негативного воздействия на окружающую среду и экологическую обстановку, в том числе с использованием математического моделирования.

В части области исследований диссертационная работа соответствует п. 6 «Разработка малоотходных, энергосберегающих, экологических технологий производства и первичной обработки текстильных материалов и сырья»; п. 10 «Экологические проблемы производства материалов и ИТЛП» и п. 21 «Теоретические основы и разработка способов переработки отходов текстильного, швейного, кожевенного, мехового, обувного и кожевенно-галантерейного производств». паспорта научной специальности «2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности».

Цель исследования – разработка эффективного контактного аппарата утилизации теплоты и очистки выбросных газов предприятий текстильной и легкой промышленности с использованием методов математического моделирования.

Объект исследования – контактные аппараты утилизации теплоты и мокрой очистки выбросных газов предприятий легкой промышленности.

Предмет исследования – энергосберегающие мероприятия, конструкции аппаратов утилизации теплоты выбросных газов, процессы тепло-и массопереноса, локальные параметры состояния теплоносителей.

Для достижения поставленной цели в диссертации:

- разработана математическая модель расчета технологических процессов в контактном аппарате утилизации теплоты и очистки выбросных газов.
- создан программный комплекс, позволяющий определять оптимальные параметры устройств для утилизации теплоты и очистки отработанных газов.
- выполнен пробный расчет процессов в контактном аппарате для утилизации теплоты и очистки отработанного воздуха.
- проанализированы конструктивные и рабочие параметры разработанного аппарата,
- определены критериальные математические выражения, позволяющие найти локальные коэффициенты теплоотдачи, массоотдачи и потерю давления, и при этом обеспечить наименьшее расхождение с результатами, полученными практическим путем.
- спроектирован современный экологически эффективный контактный аппарат утилизации теплоты и мокрой очистки выбросных газов.

Исследования выполнены на кафедре Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)» в рамках Гранта Российского фонда фундаментальных исследований - 20-38-90061 «Аспиранты», № Договора 20-38-90061\20 от 31.08.2020г. «Разработка системы мокрой очистки выбросных газов и утилизация их теплоты».

Методы исследования и технические средства решения задач.

В проведенных исследованиях применялись теоретический, расчётно-аналитический и экспериментальный методы, позволяющие обеспечить комплексный подход к решению поставленных задач.

Теоретический метод включал в себя анализ существующих технологий утилизации теплоты и очистки выбросных газов, изучение литературы по вопросам теплообмена и утилизации теплоты, а также разработку математических моделей для прогнозирования эффективности работы систем мокрой очистки.

Расчётно-аналитический метод использовался для определения ключевых параметров работы контактных аппаратов утилизации теплоты и очистки выбросных

газов, таких как коэффициенты теплоотдачи, массообмена и потеря давления. Это позволило оптимизировать конструктивные решения и условия эксплуатации установок.

Экспериментальный метод включал проведения опытов на действующих производственных установках. Оценка результативности работы систем проводилась с использованием измерительных приборов, что позволило сопоставить расчетные данные с экспериментальными и корректировать модели для достижения необходимой точности.

В совокупности применяемые методы обеспечивают системный подход к разработке эффективных решений в области утилизации теплоты и очистки выбросных газов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- создана новая расчетная математическая ячеечная модель, позволяющая на основе полученных данных выполнить рациональный выбор контактного теплообменного аппарата, причем модель при расчете учитывает локальные явления в рабочем объеме, что повышает степень утилизации теплоты отработанных газов, а также уровень очистки вредных выбросов в атмосферу.

- доказано, что наибольший вклад в тепловую мощность процесса вносит теплота конденсации влаги, при этом фазовое равновесие происходит на неполной высоте загрузки теплообменника, в следствии чего оставшаяся часть не оказывает влияния на тепловую мощность, а также дополнительно создает аэродинамическое сопротивление.

- представлена математическая зависимость, позволяющая определить оптимальную высоту анализируемого теплообменного аппарата, обеспечивающую максимальную разность между тепловой мощностью и мощностью, которая уходит на поддержание транспортировки рабочего газа через рабочую загрузку аппарата.

- получены критериальные уравнения, которые позволяют рассчитать локальные коэффициенты тепло- и массоотдачи, а также потери давления;

- математически описана зависимость между габаритными размерами рабочей загрузки, ее аэродинамическим сопротивлением от плотности орошения.

Теоретическая значимость работы. Для развития теоретических аспектов науки в технологии производства изделий текстильной и легкой промышленности имеют значение:

- новая математическая ячеечная модель, которая позволяет моделировать процессы контактного тепломассопереноса, а также процесс очистки вредных соединений в теплообменном аппарате.

- созданный программный комплекс, позволяющий на основе новой инженерной методики осуществить расчет и определить оптимальные конструктивные характеристики анализируемого аппарата.

Практическую значимость работы составляют:

- результаты расчета реально действующего теплообменного аппарата марки ЭК-БМ-1-1.

- результаты сравнительного анализа расчетных и опытных данных утилизации теплоты выбросных газов при использовании разработанного аппарата.

- оптимальная высота заполнения нового форсуночного контактного теплообменного аппарата, при которой его тепловая мощность, что максимально приближена к теоретически возможному значению при соответствующем наборе исходных параметров.

- экологически эффективный контактный теплообменный аппарат, который осуществляет работу на отходящих газах с сушильного производства, экономия энергии составляет 900 кВт, в денежном эквиваленте 620 тыс. руб./год, в том числе значительно снижается количество выбросов в атмосферу.

Достоверность и обоснованность работы обеспечивалась комплексом теоретических, расчётно-аналитических и экспериментальных исследований, который основан на общих принципах фундаментальной науки и научных основах прогрессивной техники и технологии. Экспериментальные исследования проводились на действующих установках, а также стендах специализированных лабораторий ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина».

Основные положения, выносимые на защиту:

- новая математическая расчетная ячеечная модель, позволяющая определять оптимальный рабочий режим теплообменных контактных аппаратов, учитывая при этом локальные изменения параметров рабочих сред.

- программный комплекс, реализовывающий принцип расчета на основе ячеечной модели для предприятий легкой промышленности.

- практическое обеспечение разработанной модели и метода расчета, включающее в себя определение критериальных функций, описывающих взаимосвязи между коэффициентами теплопередачи и массопереноса, а также аэродинамическим сопротивлением, которое, в свою очередь, зависит от плотности орошения.

- результаты расчета контактного теплообменника, позволяющие выбрать оптимальный вариант конструктивных характеристик аппарата.

Личный вклад автора. Соискателем сформулированы цель и основные задачи исследования, проведен анализ и систематизация литературных данных по тематике исследований, разработана новая математическая ячеечная модель и на ее основе создан программный комплекс, который позволяет осуществлять расчет и определять оптимальные конструктивные характеристики теплообменных аппаратов. Обобщение полученных результатов выполнены при участии научного руководителя М.П. Тюрина. Доля соискателя в опубликованных с соавторами работах по теме диссертации составляет от 20 до 100%.

Апробация и реализация результатов работы.

Основные результаты исследования были представлены, рассмотрены и опубликованы в ведущих научных изданиях, а также получили одобрение на всероссийских и международных конференциях: Международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» (ИННОВАЦИИ – 2020), Москва, 2020; Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2020)», посвященная Юбилейному году в ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», Москва, 2020; Конференции молодых исследователей с международным участием «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2021)», Москва, 2021; Международном научно-техническом Симпозиуме «Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвященном 110-летию А.Н. Плановского, Москва, 2021; Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2022)», Москва, 2022.

Публикации. Основные результаты выполненных исследований опубликованы в 13-и печатных работах, в том числе в двух изданиях, рекомендованных ВАК, и четыре статьи в международной базе данных Scopus.

Объем работы. По своей структуре диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по каждой главе, заключения, списка литературы. Работа изложена на 166 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков, 16 таблиц. Список литературы включает 133 библиографических и электронных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении обоснована актуальность темы, обозначены цели и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ современных технологий, направленных на утилизацию тепловой энергии и очистку отходящих газов предприятий легкой промышленности. Применение контактных аппаратов позволяет значительно повысить уровень утилизации теплоты выбросных газов за счет охлаждения парогазовой смеси ниже точки росы и конденсации находящихся в ней водяных паров. Стоит учесть, что реализация данных достоинств возможна только тогда, когда выбор параметров аппарата выполнен в результате достоверных методов его расчета. В завершении первой главы поставлены задачи по разработке новой математической ячеечной модели, которая позволит определять оптимальные режимы работы контактных теплообменных аппаратов, учитывая локальные процессы, происходящие в рабочих средах. Также на основе этой модели планируется разработка нового

контактного теплообменного аппарата, предназначенного для утилизации тепловой энергии и снижения выбросов вредных веществ с предприятий легкой промышленности. Проведенный обзор научно-технической литературы подтвердил важность утилизации тепла отработанных газов для повышения эффективности тепловых установок, а также необходимость совершенствования центробежно-инерционных устройств, включая скрубберы и пылеуловители мокрой очистки выбросных газов.

Во второй главе представлено описание новой ячеечной модели, которая способна моделировать процессы контактного теплопереноса, а также процесс очистки вредных соединений в теплообменном аппарате.

Конечный вид ячеечной модели с учетом преобразований и допущений, о которых идет речь во второй главе, представлен на рисунке 1.

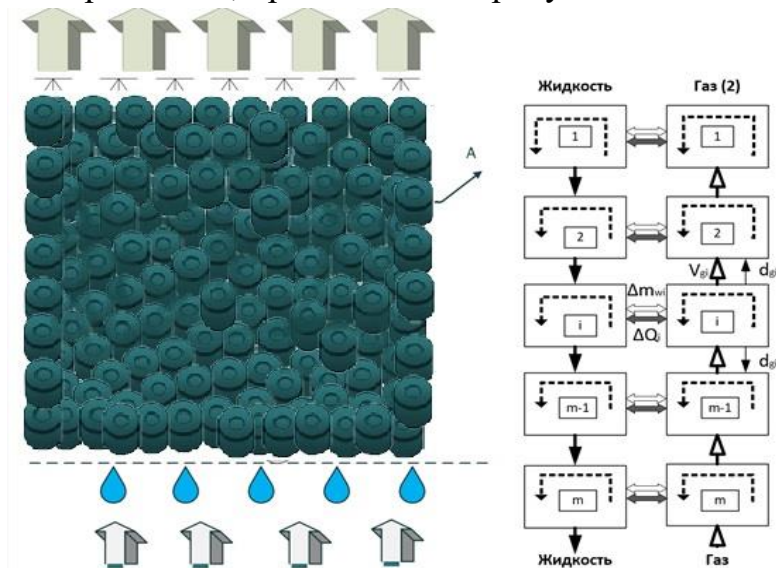


Рисунок 1 – Новая математическая расчетная ячеечная модель

Основой модели является ячейка, которая считается фундаментальным элементом. Как видно из рисунка 1 специально выделяется два канала, где один канал описывает проток жидкости, а другой канал описывает проход парогазовой смеси. Накладывая геометрическую структуру на алгоритм построения ячеечной модели можно перейти к формированию ячеечной модели для случая контактного теплообменника.

Характерное состояние обеих сред в звеньях-ячейках может быть описано с помощью векторов-столбцов следующего вида:

$$\begin{aligned} Q_w &= [Q_{w1} \dots Q_{wm}], & t_w &= [t_{w1} \dots t_{wm}], \\ m_w &= [m_{w1} \dots m_{wm}], & & \text{и т. д.,} \end{aligned} \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, m$ и размер всех векторов равен $m \times 1$.

Допустим, что в рассматриваемый момент времени состояние модели характеризуется следующим набором параметров Q_w^k, t_w^k, m_w^k и т. д. Спустя установленный временной диапазон Δt , в течение которого в нашей модели тепло и

масса способно перейти только в смежные звенья-ячейки, но никак не далее за ними, в свою очередь k -ое распределение всех анализируемых параметров перейдет в состояние $(k+1)$ -ое. При таком описании параметр времени также присваивает себе аргумент k , который характеризует номер перехода.

Также в главе был произведен расчет тепловой нагрузки. Основываясь на базовой формуле для определения величины передаваемой теплоты (Q) между стенками теплообменника от одной среды к другой, теплопередача может быть рассчитана как произведение коэффициента теплопередачи, температуры на границе раздела сред и площади поверхности теплообмена:

$$Q = F \cdot K \cdot \Delta t_{cp}, \quad (2)$$

где F – общая площадь теплопередачи (m^2); K – коэффициент поверхности теплопередачи (m^2); K – коэффициент эффективности пленки ($\frac{Вт}{m^2 \cdot K}$), $cp \Delta t$; Δt_{cp} – средний температурный напор.

В заключении главы продемонстрирована связь между передачей тепловой мощности с первичной температурой и содержанием влаги в газе.

В третьей главе рассматриваются вопросы верификации расчетной модели теплообменного оборудования, оптимизация его рабочих характеристик, а также сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных для оценки погрешности. В отличие от традиционных инженерных методик, где используются приемы усреднения и не учитываются локальные физические процессы, новая расчетная модель способна анализировать межфазное взаимодействие на основе локальных разностей потенциалов переноса.

Для поиска параметров математической модели использовались экспериментальные данные Научно-исследовательского института санитарной техники и оборудования зданий и сооружений (НИИСТ). Эмпирические данные были получены на установке, которая обладает следующими характеристиками: температура поступающей воды: $t_{w0} = 12 \text{ } ^\circ\text{C}$; диаметр обогревающей камеры: $D = 200$ мм; элемент насадки (кольца Рашига): $35 \times 35 \times 4$ мм; высота рабочей загрузки: 110, 310, 700, 1000 мм; температура поступающего газа: $t_{g0} = 200 \dots 260 \text{ } ^\circ\text{C}$; скорость газов: $V_g = 0,4 \dots 1,9$ м/с; содержание влаги: $d_0 = 100 \dots 120$ г/кг; плотность орошения насадки: $g_0 = 3 \dots 55$ м³/м²·ч; схема движения поступающих сред: противоток.

По итогам анализа результатов, полученных экспериментальным путем, выведена формула для критерия Нуссельта, которая дает наименьшую погрешность:

$$Nu = 0,016 \cdot Re_g^{1,3} \cdot Pr^{0,33} \text{ при } Re_g < 200, \quad (3)$$

$$Nu = 0,035 \cdot Re_g^{0,67} \cdot Pr^{0,33} \cdot g_w^{0,17} \text{ при } Re_g \geq 200, \quad (4)$$

где

$$Re_g = \frac{w_g \cdot D_r}{\nu_g}, \quad (5)$$

$$g_w = \frac{G_w}{G_{gd}}, \quad (6)$$

Для того, чтобы определить коэффициент массоотдачи требуется прибегнуть к теории об аналогии тепломассообменных процессов – «тройная аналогия». Следуя логике данной теории, необходимо воспользоваться уравнением типа:

$$Nu_D = a \cdot Re^n \cdot Pr_D^m, \quad (7)$$

где a , n , m – одни и те же параметры;

Nu_D и Pr_D - «диффузионные» критерии, которые определяются, как:

$$Nu_D = \frac{\beta \cdot l}{D_g}, \quad (8)$$

$$Pr_D = \frac{\nu}{D_g}, \quad (9)$$

где D_g коэффициент диффузии водяного пара в газе.

Результаты сравнения рабочих параметров аппарата ЭК-БМ-1-1 и данных, полученных с помощью различных методов моделирования, приведены в таблице 1, которая позволяет оценить эффективность различных подходов и определить наиболее точный метод прогнозирования параметров системы.

Таблица 1 – Рабочие характеристики аппарата ЭК-БМ-1-1

Высота слоя, мм		484	500	550	980	960
Скорость газа, м/с		0,9	2,2	1,5	0,9	0,94
Плотность орошения, м ³ /м ² ·ч		28	15	10	15	31
Температура воды на входе, °С		15,5	14,0	16,5	15,0	15,0
Температура воды на выходе, °С		24,3	38,5	42,2	40,0	27,2
Температура газа на входе, °С		266	240	235	436	425
Температура газа на выходе, °С (эксперимент)		27,0	45,0	52,5	47,3	32,0
Температура газа на выходе, °С (расчет / погрешность, %)	Базовая модель	28,4/5	46,6/3,5	53,3/1,5	52,7/3	33,2/3,7
	Ячеечная модель	25/-7,4	41/-4,4	48/-8,6	43,3/-4,9	29/-9,4

В таблице 1 в последних нижних строках представлены данные, полученные экспериментальным путем, расчетным путем по ячейной модели и расчетным путем по базовой модели соответственно.

Расчетные данные по предлагаемой новой методике в плане погрешности остаются в пределах 4,9 %, что вполне можно квалифицировать как приемлемый показатель. Полученные данные по новой методике дают относительную погрешность в сторону завышения температурных величин, что можно объяснить игнорированием

тепловых потерь во внешнюю среду. Средний показатель по расчетной температуре дает погрешность в 3,1 %.

Оценка температуры отходящих газов по классической базовой модели дают результаты, имеющие большее отклонение, чем результаты, полученные по новой методике. Максимальное отклонение расчетной температуры от экспериментальных данных равняется 9,4 %, а средний показатель составляет 6,9 %.

Очевидно, что предлагаемая модель позволяет получить на выходе расчета более приемлемый результат. Помимо этого, модель дает понимание протекания локальных процессов в рабочем объеме анализируемого аппарата, чего совсем не может предоставить старая методика.

В четвертой главе описывается разработка энергосберегающих и экологически эффективных мероприятий на производстве фосфатных продуктов, где применяется сушильная установка, в состав которой входит распылительная сушилка с дисковым диспергатором, пылеуловитель типа ВПУ, путем внедрения в производственную линию нового эффективного аппарата мокрой очистки выбросных газов. Оптимальная высота рабочей насадки разрабатываемого аппарата составляет 2,2 м, что обеспечивает наилучшее соотношение между тепловой мощностью (до 8240 кВт) и гидравлическим сопротивлением (480 Па).

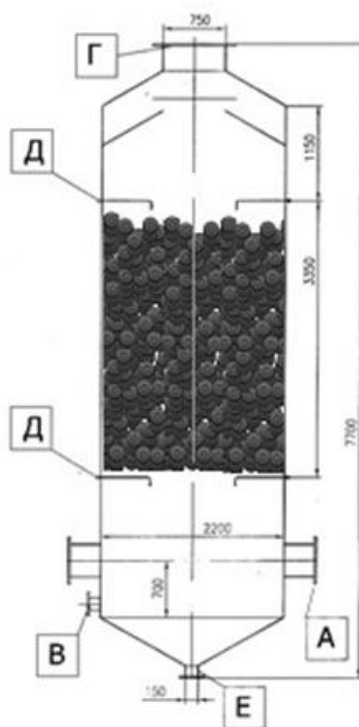


Рисунок 2 - Схема разрабатываемого аппарата с форсуночным орошением

Полученные данные с помощью новой расчетной методики, а также данные, полученные экспериментальным путем для конкретного случая – разрабатываемого аппарата с форсуночным орошением, у которого рабочий размер внутреннего пространства 2200 мм, сопоставлялись между собой. Усредненное отклонение между

теоретическим и практическим подходами составил около 5,9 %, причем максимальный показатель составляет 11,5 %.

Проведена сравнительная характеристика результатов расчета разработанного аппарата, полученным по классической методике и новой, представленной в данной работе ячеечной методике. Для этого произведен ряд общих расчетных оценок обоих расчетных методик, для рассмотренного ранее базового случая, где $t_{w0} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{g0} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $d_0 = 0,2 \text{ кг/кг}$.

Таблица 2 – Результаты, полученные разными методиками

Параметр	Базовый метод	Ячеечная модель
N_{cond}	930 кВт	850 кВт
t_{gout}	72 $^{\circ}\text{C}$	75,5 $^{\circ}\text{C}$
t_{wout}	80,2 $^{\circ}\text{C}$	79,0 $^{\circ}\text{C}$

Анализ данных таблицы 2 показывает, что расчеты, выполненные по базовой методике, существенно занижают результаты. Объяснить недостаток классического можно тем, что зависимость потенциалов переноса от температуры реально имеет нелинейный характер, и усреднять температуру по многим локальным температурным зонам не является верным приемом, и в итоге дает существенную погрешность.

Точность результатов, полученных расчетным путем по базовой методике, проверялась сопоставлением с данными, полученными экспериментальным путем.

Полученные результаты по новой методике дают относительную погрешность в сторону завышения температурных величин, что можно объяснить игнорированием тепловых потерь во внешнюю среду. Средний показатель по расчетной температуре дает погрешность в 6,8 %.

Оценка температуры отходящих газов по классической базовой модели дают результаты, имеющие большее отклонение, чем результаты, полученные по новой методике. Максимальное отклонение расчетной температуры от экспериментальных данных равняется 5,2 %, а средний показатель составляет 3,1 %.

На основе представленного расчета теплообменного аппарата проведена проверка данных, полученных по балансовому методу, с уточнениями при помощи новой ячеечной модели. Диаметр аппарата 2,2 м, а высота рабочей загрузки является варьируемой величиной. Полученные результаты представлены на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что те же зависимости, но при поступающей воде при температуре 18 $^{\circ}\text{C}$, когда необходимая тепловая мощность для ее дополнительного догрева до уровня 90 $^{\circ}\text{C}$ составляет 920 кВт, что обеспечивается при высоте рабочей загрузки равной 2,2 м. Стоит отметить, что съем тепла от рабочего газа при этом уменьшается, таким образом, температура выбросных газов составит 100 $^{\circ}\text{C}$, а содержание воды в них 0,085 кг/кг. Уменьшение высоты рабочей загрузки приводит к уменьшению аэродинамического сопротивления до 830 Па.

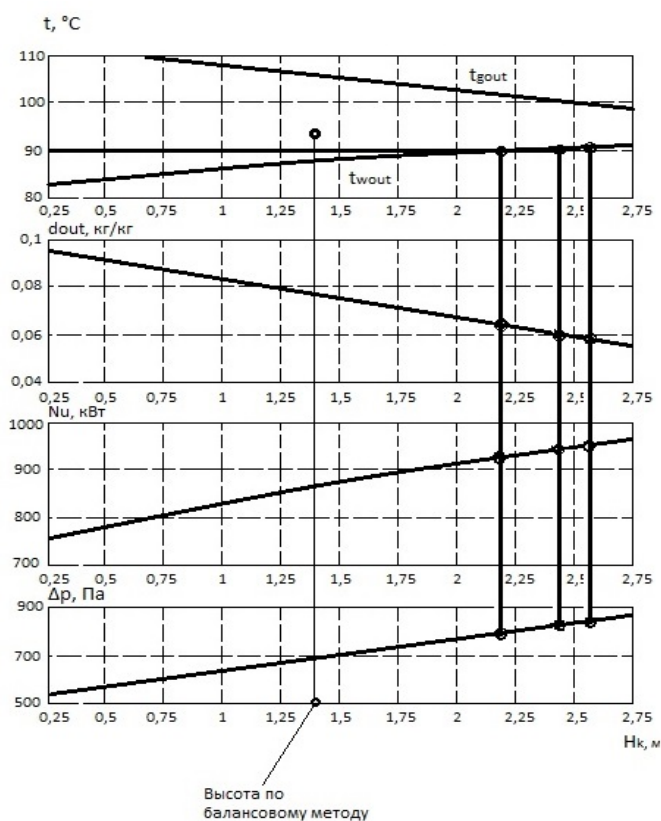


Рисунок 3 – Зависимость высоты рабочей загрузки на рабочие параметры теплообменного аппарата: загрузка – кольца Рашига $25 \times 25 \times 3$ мм, $t_{win} = 10$ °С

Валидация вычислений путем сравнения с эмпирическими данными показала высокий уровень сходимости. Внедрение новой системы расчёта утилизации тепла обеспечило прирост тепловой мощности на 900 кВт, что позволило достичь экономического эффекта в 620 тыс. рублей в год. Расчеты показали, что ячеечная модель более точна по сравнению с балансовой, с отклонением всего в 0,24%, что подтверждает ее применение для детализированных расчетов. Оптимальная высота заполнения разработанного аппарата составляет 2,2 метра, при которой тепловая мощность достигает 8240 кВт, а падение давления составляет 480 Па.

Также проведенные расчеты и моделирование показали, что разрабатываемый аппарат способен эффективно очищать выбросные газы от CO , CO_2 и NO_x . Наибольшая эффективность очистки достигается для NO_x (90 %), тогда как для CO_2 эффективность ниже (10 %), что требует дальнейшей оптимизации работы аппарата. Оптимальная высота скруббера 2,2 метра обеспечила необходимые условия для максимальной эффективности очистки при минимальных потерях давления.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Создана новая ячеечная модель, позволяющая значительно улучшить анализ процессов теплообмена в аппаратах. Учитывая локальные процессы внутри рабочего

объема установки, данная модель обеспечивает более точные и эффективные результаты расчетов, что является важным шагом для оптимизации работы теплообменных систем.

2. Разработан программный комплекс для определения оптимальных параметров теплообменных аппаратов стала важным инструментом в области проектирования. Комплекс позволяет не только оценить, но и настраивать энергетические характеристики аппаратов для достижения максимальной эффективности, что особенно важно в свете растущих требований к энергосбережению.

3. Сравнительный расчет контактного теплообменника ЭК-БМ-1-1 с использованием новой модели показал хорошую сходимость результатов исследований и позволило распространить их на исследование новых аппаратов.

4. Установлена оптимальная высота аппарата ЭК-БМ 1-1 0,83м, что обеспечило значительное увеличение разности между тепловой мощностью 830 кВт и мощностью, затрачиваемой на преодоление аэродинамического сопротивления 700 кВт, что является ключевым моментом для эффективной работы системы. Годовой экономический эффект составил 485 тыс руб.

5. Разработан эффективный контактный теплообменный аппарат для новых условий сушки фосфатных материалов. Ожидаемая экономия в 900 кВт, эквивалентная 620 тыс. руб./год, является важным вкладом в улучшение общей производственной эффективности.

6. Проведен сравнительный анализ расчетных и опытных данных работы разработанного контактного аппарата утилизации теплоты выбросных газов, продемонстрировав среднюю погрешность всего 3,1 % при максимальной частной погрешности в 5,2 %. Эти показатели свидетельствуют о высокой точности модели и ее потенциальной применимости на практике. Анализ данных подтвердил, что традиционный расчет по классической методике с использованием балансовых уравнений приводит к большему отклонению от практических значений, с усредненным отклонением в 6,9 %. Это подчеркивает важность применения более современных подходов для повышения точности прогнозов.

7. Выявлено, что оптимальная высота заполнения разработанного аппарата составляет 2,2 метра. При такой высоте достигается оптимальное соотношение между тепловой мощностью и гидравлическим сопротивлением. При высоте 2,2 метра тепловая мощность составляет 8240 кВт, что максимально приближено к теоретически возможному значению при данном наборе исходных параметров. Падение давления при этой высоте относительно невелико – 480 Па, что позволяет обеспечить экономичную работу разработанного аппарата без увеличения затрат на энергию прокачки.

Публикации, отображающие основное содержание диссертации:

• Статьи в изданиях, входящих в «Перечень» ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Карев А.Н., Костров А.А., Тюрин М.П., Бородина Е.С., Апарушкина М.А. Очистка выбросов и утилизация теплоты после распылительной сушки // Дизайн и технологии. – 2020. – № 72. – С.45-48.
2. Карев А.Н., Тюрин М.П. Расчетный метод оценки средних значений процессов тепло- и массообмена в контактном аппарате // Безопасность труда в промышленности. 2025 № 02. С. 73–80.

• Статьи в изданиях, индексируемых в базе SCOPUS:

3. Karev, A.N., Tyurin, M.P., Sedlyarov, O.I. et al. Calculation of Heat and Mass Transfer Processes in a Heat Exchanger. *Fibre Chem* 55, 413–415 (2024).
4. Karev, A.N., Tyurin, M.P., Sedlyarov, O.I. et al. Improvement of Air Purification and Heat Recovery Systems for Industrial Emissions. *Fibre Chem* 55, 408–412 (2024).
5. Карев А.Н., Тюрин М.П. Совершенствование работы скруббера для очистки выбросных газов с повышением эффективности за счет вторичного использования теплоты // Безопасность труда в промышленности. 2024 № 12 С. 79–85.

• Другие публикации:

6. Карев А.Н. Системы очистки выбросных газов и загрязняющих веществ» / Карев А.Н. // Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2020)», посвященная Юбилейному году в ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина». – 2020. – С.47-50.
7. Карев А.Н, Тюрин М.П. Очистка выбросов и утилизация теплоты после распылительной сушки // Международная научно-техническая конференция «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» (Инновации – 2020), Сборник материалов. – 2020. – Часть 3 – С.59-61.
8. Карев А.Н., Тюрин М.П. Совершенствование систем утилизации вторичных энергетических ресурсов // Всероссийская научная конференция молодых исследователей с международным участием «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2021)», Сборник материалов. – 2021. – Часть 5 – С.99-101.
9. Карев А.Н, Тюрин М.П. Совершенствование систем утилизации теплоты энергетических ресурсов // Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума (МНТС) «Повышение энергоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвященного 110-летию А.Н. Плановского. – 2021. – Направление 1. – Секция 1. – С.137-139.
10. Карев А.Н, Тюрин М.П. Эффективность использования аппаратов мокрой очистки выбросных газов в промышленности // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия Естественные и Технические науки. – 2021. – №9. – С.19-25. (ВАК).
11. Карев А.Н, Тюрин М.П. Разработка аппарата мокрой очистки выбросных газов и утилизация их теплоты. // Международный Научно-исследовательский журнал. – 2021. – №10(112) – Ч.1. – С.153-158.
12. Карев А.Н, Тюрин М.П. Эффективность применения скрубберного метода очистки выбросных газов в промышленности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2021. – №4 – С.371-380.
13. Карев А.Н, Тюрин М.П. Аппаратурное оформление процесса мокрой очистки выбросных газов // Всероссийская научная конференция молодых исследователей с международным участием «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2022)», Сборник материалов. – 2022. – Часть 4 – С.145-147.

КАРЕВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ И ЭКОЛОГИЧНОЙ
МОКРОЙ ОЧИСТКИ ВЫБРОСНЫХ ГАЗОВ В ПРОИЗВОДСТВАХ ТЕКСТИЛЬНОЙ
И ЛЁГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Специальность 2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой
промышленности

Бумага офсетная. Печать цифровая

Подписано в печать _____ г.

Формат бумаги 60×90/16.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж ____ экз. Заказ № ____.