

На правах рукописи



Бадретдинова Гузель Рамилевна

**ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ С ТВЕРДЫМИ
ЧАСТИЦАМИ НА ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ В ТЕПЛООБМЕННЫХ
АППАРАТАХ**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Дмитриев Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: **Гаряев Андрей Борисович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Тепломассообменные процессы и установки» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор

Лопатин Алексей Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Реактивные двигатели и энергетические установки» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново

Защита диссертации состоится 20 марта 2025 г. в 11 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел.: (843)519-42-58.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.03, Svetlana-zag@bk.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте <https://kgeu.ru>.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Борисова Светлана Дмитриевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На сегодняшний день приоритетным направлением в сфере энергетической промышленности всех стран мира является энергосбережение и повышение энергоэффективности технологического оборудования, которое способствует рациональному использованию ресурсов и снижению выбросов, негативно влияющих на окружающую среду.

Во многих сферах промышленности теплообменные аппараты применяются в конденсационных котлах, тепловых насосах, экономайзерах, парогенераторах, охладителях и т.п. Во время эксплуатации теплообменные аппараты подвержены интенсивному внешнему загрязнению. Загрязнение оребренных поверхностей в теплообменном оборудовании способствует снижению коэффициента теплопередачи, что влечет к экономическим потерям промышленных компаний.

Конденсация парогазовой смеси, которая содержит в себе твердые частицы, в процессе передачи тепла сопровождается образованием отложений на оребренной поверхности в теплообменном аппарате, вследствие этого, происходит снижение теплового потока. Исследования по прогнозированию образования отложений на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах и определению интенсивности теплообмена способствуют минимизации степени загрязнения, так как результаты работы позволят определить место установки в корпусе аппарата форсуночных устройств для очистки водой оребренных поверхностей в теплообменнике от твердых частиц. Все это обуславливает актуальность темы данной работы.

Степень научной разработанности проблемы. Интенсификацией теплообмена в технологических устройствах, предназначенных для передачи тепла, в разные годы занимались С.С. Кутателадзе, Ю.Ф. Гортышев, В.В. Олимпиев, Ю.Г. Назмеев, И.А. Попов, Н.Д. Якимов, А.В. Щукин, А.Б. Гаряев, В.В. Бухмиров, А.Н. Николаев, М.А. Пахомов, В.И. Терехов, С.А. Исаев и другие отечественные и зарубежные ученые.

Большое количество работ посвящено изучению теплообмена в рекуперативных устройствах при передаче тепла от парогазовых смесей к теплоносителю. Однако имеется недостаток научно обоснованных рекомендаций по выбору геометрических и режимных характеристик теплообменных аппаратов при передаче тепла от парогазовых смесей, содержащих твердые частицы, к теплоносителю. Разработка математических моделей, позволяющих прогнозировать образование отложений на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах, является одним из способов повышения энергоэффективности. Обозначенные выше практические и теоретические проблемы позволили сформулировать цель и задачи настоящего исследования.

Объектом исследования является теплообменный аппарат с оребренными поверхностями, предназначенный для конденсации парогазовых смесей с твердыми частицами.

Предметом исследования является процесс образования отложений твердых частиц на наружной оребренной поверхности в теплообменном аппарате и теплообмен при конденсации парогазовой смеси.

Цель работы и основные задачи исследования. Целью работы является разработка математической модели образования отложений на наружной оребренной

поверхности в теплообменнике и исследование теплообмена при конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

Задачи исследования:

1. Проведение анализа существующей проблемы осаждения твердых частиц на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах при конденсации парогазовых смесей, содержащих твердые частицы.

2. Построение математических моделей процесса образования отложений на поверхности ребер цилиндрической и прямой формы при конденсации парогазовых смесей, содержащих твердые частицы.

3. Подбор модели турбулентности, адекватно описывающей теплообменные процессы при внешнем обтекании нагреваемой трубы с различным оребрением.

4. Проведение численного исследования конденсации парогазовой смеси на поверхности спиральных ребер, сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными на промышленном объекте.

5. Разработка инженерной методики, позволяющая рассчитать процесс восстановления оребренной поверхности теплообмена после загрязнений путём смывания отложений водой.

Методы исследования. Уравнения математической модели строятся на основе законов сохранения энергии и массы, их исследование и оценки проводятся с применением аналитических методов теории дифференциальных уравнений, методов теории подобия и размерностей, а также численных методов решения краевых задач. Для проведения численных расчетов и построения графических зависимостей использовались пакеты прикладных программ ANSYS Fluent и Microsoft Excel.

Научная новизна работы:

1. Разработаны математические модели процесса образования отложений на поверхности цилиндрических и прямых ребер в теплообменных аппаратах при конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

2. Получено автомодельное решение задачи о конденсации на прямом ребре парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

3. Разработана и верифицирована трехмерная модель, позволяющая рассчитывать характеристики тепло- и массообмена при движении воды в трубе при значениях температур близких к температурам кипения в переходном режиме течения.

4. Получена зависимость коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности трубы со спиральными ребрами при конденсации пара на ней от плотности отбираемого теплового потока при входной скорости.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов математических моделей подтверждается использованием фундаментальных уравнений сохранения и переноса массы, энергии и импульса. Достоверность научных положений, теоретических выводов и практических рекомендаций диссертации подтверждается хорошим совпадением результатов математического моделирования с экспериментальными данными, а также широкой публикацией результатов и их обсуждением на международных и российских конференциях.

Теоретическая значимость работы включает разработку математических моделей процесса образования отложений на теплообменных поверхностях, получение автомодельного решения задачи о конденсации парогазовой смеси,

создание трехмерной модели для расчета тепло- и массообмена в трубах с учетом температур кипения и получение зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока и скорости потока, что способствует оптимизации работы теплообменных систем и повышению их эффективности.

Практическое значение работы:

1. В 2020 году была проведена научно-исследовательская работа на тему: «Расчет теплообменного аппарата для нагрева воды за счет тепла парогазовой смеси» по заказу компании ООО «Филиал ВПМ», г. Казань.

2. Результаты исследования автора приняты к использованию в учебном процессе при чтении дисциплины «Техническая термодинамика и теплообмен» для студентов в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

3. Разработана инженерная методика, позволяющая рассчитать процесс восстановления оребренной поверхности теплообмена после загрязнений путём смывания отложений водой.

4. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая моделировать образование отложений на поверхности оребренных труб в теплообменных аппаратах при конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681667 РФ).

5. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая моделировать образование отложений на поверхности прямых ребер в теплообменных аппаратах при конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

На защиту выносятся:

1. Математические модели процесса образования отложений на поверхности цилиндрических и прямых ребер в теплообменных аппаратах при конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

2. Автомодельное решение задачи о конденсации на прямом ребре парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

3. Разработанная и верифицированная трехмерная модель, позволяющая рассчитывать характеристики тепло- и массообмена при движении воды в трубе при значениях температур близких к температурам кипения в переходном режиме течения.

4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности трубы со спиральными ребрами при конденсации пара на ней от плотности отбираемого теплового потока при входной скорости.

5. Инженерная методика, позволяющая рассчитать процесс восстановления оребренной поверхности теплообмена после загрязнений путём смывания отложений водой.

Апробация работы. Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXI – XXII Бенардосовские чтения) (ИГЭУ, г. Иваново, 2021г., 2023г.); ежегодной международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, г. Москва, 2022г.); на XII Международной научно-технической конференции «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование» (АУЭС им. Г. Даукеева, г. Алматы, 2022г.); ежегодной конференции «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (КНИТУ-КХТИ, г. Казань, 2022г.); ежегодных форумах «Татарстанский международный форум по энергетике и

энергоресурсоэффективности» (г. Казань, 2023-2024гг.); на итоговой научной конференции сотрудников Казанского университета за 2023 г (К(П)ФУ, г. Казань, 2024г.); на XXVII Всероссийском аспирантско-магистерском научном семинаре, посвященному Дню энергетика (КГЭУ, г. Казань, 2023г.); на III Всероссийской с международным участием молодежной конференции «Бутаковские чтения» (ТюмГУ, г. Томск, 2023г.); ежегодной международной молодёжной научной конференции «XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (КНИТУ им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, 2023г.); ежегодной международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения – 2024 «Энергетика и цифровая трансформация» (КГЭУ, г. Казань, 2024г.).

Публикация работы. По материалам диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России для соискателей ученых степеней доктора и кандидата наук, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных цитирования Scopus, 1 свидетельство на ЭВМ.

Вклад автора в проведенное исследование. Автор лично участвовал в постановке цели и задач исследований, разработке математической модели и инженерной методики расчета, проведении численного моделирования, в получении результатов, представленных в диссертации и публикациях.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника» и охватывает следующие направления: П4. Процессы переноса массы, импульса и энергии при свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей и характеристик теплопередающих поверхностей, в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях. Радиационный теплообмен в прозрачных и поглощающих средах. П5. Научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты. Процессы тепло- и массообмена в оборудовании, предназначенном для производства, преобразования, передачи и потребления теплоты. П6. Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и содержит 142 страницы машинописного текста, которая включает 47 иллюстраций, 5 таблиц. Список литературы состоит из 136 источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования. Показана научная и практическая значимость полученных результатов. Обозначены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе сделан обзор научной литературы по современному состоянию исследований загрязнения внешней поверхности оребренных труб в теплообменных аппаратах. В результате исследования выявлено, что проблема загрязнения твердыми частицами внешней поверхности оребренных труб актуальна для различных отраслей промышленности. На процесс отложения влияют геометрические параметры теплообменников, режимные характеристики потока, размер и концентрация частиц. Уравнения для расчёта толщины отложений и распределения температурного поля требуют доработки.

Во второй главе содержатся исследования по образованию отложений на внешней поверхности ребра в теплообменном аппарате (рис. 1). В данной главе представлена разработанная математическая модель образования отложений на внешней поверхности оребренных труб в теплообменном аппарате при конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы. Для этого было рассмотрено цилиндрическое ребро диаметром $2R_D$, расположенное на охлаждаемой трубе диаметром $2R_0$, так что температура в его основании на трубе $t_0 = \text{const}$. На обеих сторонах ребра происходит конденсация пара при температуре $t_s = \text{const}$, причём на его поверхности оседают загрязнения.



Рис. 1. Фото оребренных труб теплообменника со слоем отложений

В качестве искомой вводится функция избыточной температуры $\vartheta(r, \tau) = t_s - t(r, \tau) > 0$ с координатой r в момент времени τ , и, соответственно, $\vartheta_0 = t_s - t_0$. Тепловой поток Q через произвольную цилиндрическую поверхность $r = \text{const}$ в ребре, в сторону основания, по закону Фурье будет равен:

$$Q(r, \tau) = -2\pi\Lambda r \partial \vartheta(r, \tau) / \partial r, \quad (1)$$

где $\Lambda = \lambda_p \delta_p = \text{const}$ – термическая проводимость ребра, Вт/К, δ_p – толщина ребра, м, λ_p – коэффициент теплопроводности ребра, Вт/(м·К).

Поступление тепла через боковые поверхности ребра в соответствии с предположениями опишется соотношением

$$\frac{\partial Q(r, \tau)}{\partial r} = -4\pi\lambda_o r \frac{\vartheta(r, \tau)}{\delta(r, \tau)}. \quad (2)$$

Объединяя (1) и (2), получаем уравнение

$$\frac{\partial^2 \vartheta(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta(r, \tau)}{\partial r} = \frac{2\lambda_o}{\Lambda} \frac{\vartheta(r, \tau)}{\delta(r, \tau)} \quad (3)$$

$$\text{с граничными условиями } \vartheta(r, \tau)|_{r=R_0} = \vartheta_0, \quad \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right|_{r=R_D} = 0. \quad (4)$$

В соответствии с сформулированными в работе предположениями толщина отложений $\delta(r, \tau)$ увеличивается пропорционально количеству образующегося конденсата, откуда получается уравнение

$$\frac{\partial \delta(r, \tau)}{\partial \tau} = k\lambda_o \frac{\vartheta(r, \tau)}{\delta(r, \tau)}, \quad (5)$$

где $\lambda_o/\delta(r, \tau)$ – термическая проводимость отложений, Вт/(м²·К), λ_o – коэффициент теплопроводности отложений, Вт/(м·К), k – тепловой коэффициент приращения отложений, т.е. отношение объема образующихся отложений к теплоте, проходящей через поверхность, на которой они образуются, м³/Дж.

В качестве начального условия можно взять

$$\delta(r, 0) = h_0 = \text{const} > 0, \quad R_0 \leq r \leq R_D \quad (6)$$

Построение распределения $\vartheta(r)$ по заданному распределению $\delta(r)$ решением (3), (4) можно понимать как применение некоторого оператора \mathfrak{R} к $\delta(r)$, т.е. обозначать $\vartheta(r) = \mathfrak{R}(\delta(r))$. При численном решении оператор \mathfrak{R} может быть реализован в виде подпрограммы.

Подставляя \mathfrak{R} в уравнение (5), получаем уравнение вида

$$\frac{\partial \delta(r, \tau)}{\partial \tau} = P \frac{\mathfrak{R}(\delta(r, \tau))}{\delta(r, \tau)} \quad (7)$$

относительно одной функции $\delta(r, \tau)$, где $P = k\lambda_0 = \text{const}$ – температурный коэффициент роста отложений, т.е. диффузия частиц к поверхности отложений при разнице температур в 1 К, $\text{м}^2/(\text{с} \cdot \text{К})$.

В работе представлена конечно-разностная реализация оператора \mathfrak{R} . Область $R_0 \leq r \leq R_D = R_1 + l$ разбивается на n элементов, каждый из которых можно представлять в форме кольца (для внутренних $r_i - \Delta r/2 < r < r_i + \Delta r/2$, где $i = 1, \dots, n-2$) с равноотстоящими узлами в точках $r_i = il / (n-1)$, $i = 0, 1, \dots, n-1$. Вместо функции $\mathfrak{R}(r)$ отыскиваются узловые значения \mathfrak{R}_i , считая на данном этапе известными δ_i – узловые значения функции $\delta(r)$ (для $i = 0, 1, \dots, n-1$). Тогда условия баланса теплоты между элементами приводят к конечно-разностному уравнению

$$\left(1 - \frac{\Delta r}{2r_i}\right)\mathfrak{R}_{i-1} - 2\left(1 + \frac{\lambda_0}{\Lambda} \frac{\Delta r^2}{\delta_i}\right)\mathfrak{R}_i + \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_i}\right)\mathfrak{R}_{i+1} = 0, \quad i = 1, \dots, n-2. \quad (8)$$

Аналогом граничных условий будут

$$\mathfrak{R}_{i=0} = \mathfrak{R}_0, \quad \left(1 - \frac{\Delta r}{2R_D}\right)\mathfrak{R}_{n-2} - \left(1 - \frac{\Delta r}{2R_D} + \frac{\lambda_0}{\Lambda} \frac{\Delta r^2}{\delta_{n-1}}\right)\mathfrak{R}_{n-1} = 0. \quad (9)$$

Если δ_i и остальные параметры заданы, уравнения (8), (9) задают систему из n -линейных алгебраических уравнений относительно n неизвестных \mathfrak{R}_i . Такая система эффективно решается методом прогонки.

Если на некоторый момент τ^j ($j \geq 0$) известны значения толщины δ_i^j для всех i ($0 \leq i \leq n-1$), то изложенный алгоритм позволяет найти соответствующие значения \mathfrak{R}_i^j . Для численного перехода к следующему моменту времени τ^{j+1} нужно использовать численный аналог уравнения (7):

$$\delta_i^{j+1} = \delta_i^j + P \frac{\mathfrak{R}_i^j}{\delta_i^j} \Delta \tau^j, \quad i = 0, \dots, n-1, \quad (10)$$

где $\Delta \tau^j = \tau^{j+1} - \tau^j$, $j \geq 0$. Шаги $\Delta \tau^j$ можно менять в ходе счёта.

Для оценки эффективности и точности этой реализации можно использовать изложенное выше свойство оператора $\mathfrak{R}(\delta)$, согласно которому в случае $\delta = \text{const}$ он имеет точное аналитическое представление.

Для проверки точности расчёта всего процесса нарастания отложений во времени по конечно-разностным соотношениям (8) – (10) можно использовать полученное в работе точное аналитическое решение для изменения толщины отложений $\delta_0(\tau)$ со временем τ при $r = R_0$

$$\delta_0(\tau) = \sqrt{h_0^2 + 2P_1 \mathfrak{R}_0 \tau}. \quad (11)$$

При выборе достаточного числа узлов n и малых шагов $\Delta \tau^j$ в начальные моменты времени для типичных исходных параметров конечно-разностный подход даёт толщину отложений с погрешностью до тысячных долей процента.

Если ввести безразмерные координату $\chi = r / R_0$, время $T = \tau P \mathfrak{R}_0 / R_0^4 a^2$ и искомые переменные $\Theta(\chi, T) = \mathfrak{R} / \mathfrak{R}_0$, $\Gamma(\chi, T) = \delta / a R_0^2$, то появляется безразмерный параметр R_D / R_0 , а также $\Gamma_0 = h_0 / a R_0^2$. После замены параметров в уравнениях (3) – (6) и условиях однозначности на безразмерные получаем безразмерную постановку:

$$\frac{\partial^2 \Theta(\chi, T)}{\partial \chi^2} + \frac{1}{\chi} \frac{\partial \Theta(\chi, T)}{\partial \chi} = \frac{\Theta(\chi, T)}{\Gamma(\chi, T)}, \quad \frac{\partial \Gamma(\chi, T)}{\partial T} = \frac{\Theta(\chi, T)}{\Gamma(\chi, T)}, \quad 1 \leq \chi \leq R_D/R_0.$$

Граничные условия: $\Theta(1, T) = 1$, $\left. \frac{\partial \Theta(\chi, T)}{\partial \chi} \right|_{\chi=R_D/R_0} = 0$, начальное условие:

$$\Gamma(\chi, 0) = \Gamma_0, \quad 1 \leq \chi \leq R_D/R_0.$$

В случае прямого ребра в безразмерных переменных вместо R_0 подставляется L , в частности, $\chi = x/L$, $0 \leq \chi \leq 1$, граничные условия $\Theta(0, T) = 1$, $\left. \frac{\partial \Theta(\chi, T)}{\partial \chi} \right|_{\chi=1} = 0$.

На основе разработанной конечно-разностной модели рассчитывается тепловой поток, отнесенный к параметру Λ , и отводимый ребром к трубе:

$$Q_0 / \Lambda = 2\pi \left[\frac{\theta_0 - \vartheta_{i=1}}{\Delta r} (R_0 + \Delta r / 2) + \theta_0 \frac{2\lambda_0}{\Lambda} \frac{R_0 \Delta r}{2\delta_{i=0}} \right]. \quad (12)$$

Установлены зависимости изменения теплового потока, отнесенного к параметру Λ , от следующих параметров: θ_0 – разность температур ребра и окружающей среды, К. Параметры, при которых проводились вычисления, имеют следующие значения: $\theta_0 = 10, 50, 100$ °С; $\delta_p = 0,5 \cdot 10^{-3}; 1 \cdot 10^{-3}; 2 \cdot 10^{-3}$ м; $\lambda_0 = 0,037, 0,3, 0,67$ Вт/(м·К), $\lambda_p = 12, 30, 50$ Вт/(м·К).

При малых h_0 решения для конечных времён будут мало различаться, и при $h_0 \rightarrow 0$ будут приближаться к решению для постановки с исходно чистой поверхностью $h_0 = 0$. Однако возникает вопрос, существует ли это решение для $h_0 = 0$ и каковы его свойства?

Для ответа в работе рассматривается задача о прямом ребре неограниченной высоты. В работе показано, что эта задача имеет автомодельное решение в виде функций безразмерных температуры

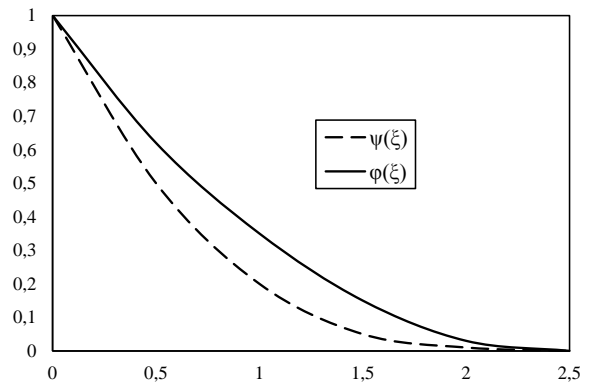


Рис. 2. Вид автомодельного решения

и толщины отложений $\delta/\sqrt{2P\vartheta_0\tau} = \varphi(\xi)$ от безразмерного аргумента

$\xi = \frac{x}{\sqrt{4\tau}} 4\sqrt{\frac{A^2}{2P\vartheta_0}}$ (где $A = 2\lambda_0/\lambda_p\delta_p$, $P = k\lambda_0$), отвечающих уравнениям

$$\psi''(\xi) = \frac{\psi(\xi)}{\varphi(\xi)}, \quad \frac{\xi}{2} \varphi'(\xi) = \varphi(\xi) - \frac{\psi(\xi)}{\varphi(\xi)} \quad (13)$$

при $0 \leq \xi < \infty$, $\varphi(0) = 1$, $\psi(0) = 1$, $\lim_{\xi \rightarrow \infty} \varphi(\xi) = 0$, $\lim_{\xi \rightarrow \infty} \psi(\xi) = 0$.

Графики зависимостей $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ показаны на рис. 2. В начальные моменты отложения появляются лишь у основания, и сначала быстро, а затем с замедлением растут по толщине и ширине.

В третьей главе были проведены исследования для теплообменного аппарата, установленного компанией ООО «Филиал ВПМ» (рис. 3.).

Для реализации численных расчетов в программном комплексе ANSYS Fluent была построена трехмерная модель трубы без оребрения и создана расчетная сетка с учетом особенностей течения. Количество элементов в расчетной сетке

изменялось в диапазоне от 3744 до 2546817. При генерации расчетной сетки рассчитывались такие критерии, как ортогональность и асимметрия, по которым оценивается качество сетки. В конце каждого расчета, помимо коэффициента теплоотдачи, определялось безразмерное значение длины y^+ – соотношение между турбулентными и ламинарными воздействиями в ячейке. Если y^+ имеет большое значение, то ячейка принимается турбулентной, а если y^+ имеет маленькое значение, то ламинарной.

При проведении расчетов рассматривались следующие модели турбулентности: Spalart-Allmaras, $k-\omega$, $k-\omega$ standard, $k-\omega$ SST, $k-\omega$ BSL, $k-\varepsilon$ standard, $k-\varepsilon$ RNG, $k-\varepsilon$ Realizable и Transition $k-kl-\omega$. Принималось,



Рис. 3. Теплообменный аппарат, установленный на промышленном объекте компанией ООО «Филиал ВПМ»

что температура на стенках трубы имеет постоянное значение $t_w = 20^\circ\text{C}$. На входе в воздуховод поступал газ с температурой 200°C . Скорость потока изменялась от 1 до 30 м/с. На выходе из воздуховода задавалось атмосферное давление. Установлено, что наиболее подходящими моделями турбулентности являются Spalart-Allmaras и $k-\omega$ SST. Проведенные исследования позволили сравнить интенсивность теплоотдачи при различных числах

Рейнольдса (Re) для нагреваемой трубы с ребрением. Количество ребер в расчетной области принималось равным 9 шт. Температура воды составляет 14°C . Остальные параметры принимались и изменялись аналогично вышеизложенному описанию. Результат сравнения показал, что интегральный коэффициент теплоотдачи от поверхности ребренных труб может быть увеличен до 40% при замене цилиндрических ребер на спиральные. Проведено исследование теплоотдачи при движении воды в трубе при температурах близких к температурам кипения в переходном режиме. Так как на основе проведенных экспериментальных данных можно было рассчитать коэффициент теплопередачи, но нельзя было определить коэффициенты теплоотдачи, что необходимо для выявления режима, решить эту задачу можно, используя численное моделирование. На рис.4-5 представлен исследуемый модуль, который был установлен в трубопровод.

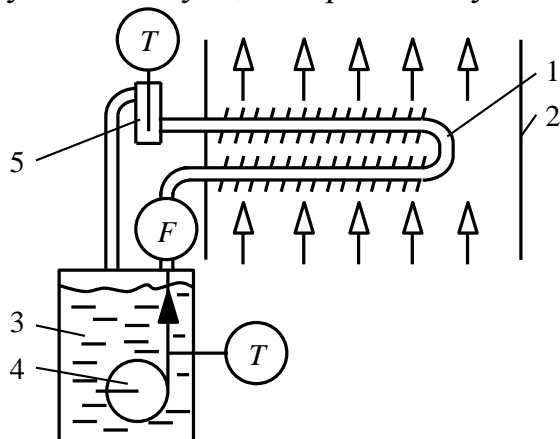


Рис. 4. Схема установки экспериментального модуля: 1 – «U»-образная труба с ребрами; 2 – трубопровод; 3 – емкость для воды; 4 – насос; 5 – емкость для термометра. T – места измерения температур; F – место измерения расхода

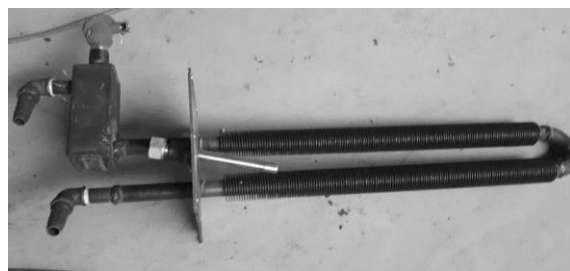


Рис. 5. Фото исследуемого модуля, который был установлен в трубопровод, по которому протекала парогазовая смесь

В расчете использовалась известная формула Б.С. Петухова и В.В. Кириллова (в англоязычной литературе называемая формулой Гнилинского), которая применима в диапазоне чисел Рейнольдса $3000-5 \cdot 10^6$, чисел Прандтля $0,5-2000$:

$$\text{Nu} = \frac{(f/8)(\text{Re} - 1000)\text{Pr}}{1 + 12,7\sqrt{f/8}(\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (14)$$

где $f = (0,79 \ln(\text{Re}) - 1,64)^{-2}$ – коэффициент гидравлического трения.

Результаты численного моделирования практически полностью совпадают с результатами, полученными на основе расчетных данных. Отклонение составило $4,81\%$. Поворот потока на 180° практически не сказался на значении числа Нуссельта, что можно объяснить низкими значениями скорости потока и, следовательно, незначительной его деформацией в этом месте.

В тоже время при исследовании в диапазоне чисел Рейнольдса $2000-4000$ расхождение результатов весьма существенное. Причин, объясняющих это, несколько: переходная область между ламинарным и турбулентным режимом, возможное возникновение областей, в которых жидкость переходит в пар.

Эксперименты проводились в диапазоне значений массового расхода воды $0,016-0,0328$ кг/с. Вода подавалась в трубу с температурой $30,8-31,8^\circ\text{C}$. Температура парогазовой смеси 220°C . Массовая доля пара в смеси $0,3$.

При моделировании в программном комплексе Ansys Fluent использовалась модель турбулентности SST $k-\omega$ и модель «Mixture». В качестве исходных данных задавались: температура на входе t_0 , массовый расход воды L_m и удельный тепловой поток. Рассчитывалась температура воды на выходе из трубы t_1 , осредненная по сечению, и температура стенки t_w .

Изначально расчеты проводились в стационарном режиме. В диапазоне расходов $0,0246-0,0328$ кг/с расчетная температура отличалась от экспериментальной менее чем на $0,42\%$. При дальнейшем понижении расхода расчеты на стационарном режиме стали невозможными из-за отсутствия сходимости решения.

Визуализация профиля температур показала, что в верхней части трубы появились области с температурой, превышающей 100°C . В связи с этим модель была дополнена уравнениями испарения и конденсации по модели Ли, а расчет проводился в нестационарном режиме.

Температура по вертикали сечения трубы может отличаться от измеренной на 50% в нижней точке, на 40% в верхней. Температура по горизонтали изменялась в гораздо меньшем диапазоне $\pm 30\%$. Температура в центре трубы практически полностью совпадала с измеренной. Во всем рассматриваемом диапазоне исследований адекватные результаты получаются лишь при учете влияния температуры на такие параметры, как поверхностное натяжение, коэффициент теплопроводности воды, коэффициент динамической вязкости воды. Расхождение результатов в этом случае менее 6% .

Процесс образования пара наблюдался до значения числа Рейнольдса 2600 . В связи с этим значения числа Нуссельта резко увеличивались, а сама зависимость их от числа Рейнольдса существенно изменялась (рис. 6).

В диапазоне значений чисел Рейнольдса $2600-3600$ наблюдается линейная зависимость, которую, с достоверностью аппроксимации $0,997$, можно записать: $\text{Nu} = 0,012\text{Re}$.

Зависимость не является достаточно общей и может быть использована только в

очень узком диапазоне. Однако, сам способ расчёта параметров теплообмена при течении жидкости в переходном режиме может применяться с достаточной достоверностью.

В работе проведено численное моделирование конденсации парогазовой смеси на поверхности трубы со спиральным оребрением. При проведении расчетов использовались система дифференциальных уравнений Навье-Стокса, которая замыкалась уравнением неразрывности и моделью турбулентности $k-\omega$ SST, уравнением энергии. Основные геометрические размеры и характеристики упрощенной трехмерной расчетной модели: параллелепипед со сторонами 122, 38 и 72 мм, труба диаметром 21 мм, длиной 38 мм и с толщиной стенки 2 мм, количество ребер 4 шт., каждое толщиной 1 мм, высота ребра везде одинаковая 9 мм, шаг между ребер 3,5 мм, материал трубы и ребер сталь 20, коэффициент теплопроводности λ задавался 48,5 Вт/(м·°C) при температуре 200°C.

Валидация результатов численных расчетов проводилась путем сравнения коэффициента теплоотдачи с данными, полученными в ходе эксперимента. Сравнение коэффициентов теплоотдачи, полученных численным и экспериментальным путем, позволило подтвердить достаточно высокую степень точности моделирования процесса конденсации парогазовой смеси на поверхности трубы со спиральными ребрами. Неопределенность составила 16,8% при плотности теплового потока от 42990 до 47325 Вт/м². Коэффициент теплоотдачи при численном моделировании варьировался от 63,7 до 72,1 Вт/(м²·°C), а при физическом эксперименте от 61,7 до 67,7 Вт/(м²·°C) (рис. 7).

Анализ полученных результатов, показал, что по мере увеличения массовой доли воды x_w в парогазовой смеси повышается осредненная температура поверхности оребренной трубы t_w . Увеличение плотности отбираемого теплового потока от внутренней стенки оребренной трубы приводит к снижению осредненной температуры наружной поверхности трубы t_w , т.к. повышается интенсивность теплообмена. Также получено, что доля теплового потока, отбираемого от парогазовой смеси за счет ее конденсации на поверхности оребренной трубы составляет до 6,4% при скорости движения смеси от 7,4 до 14,7 м/с и массовой доли воды в ней от 0,188 до 0,41. При этом установлено, что увеличение скорости движения парогазовой смеси и массовой доли воды в ней способствует повышению доли теплового потока, отбираемого от нее за счет ее конденсации.

Изменение массовой доли воды в парогазовой смеси от 0,188 до 0,41 сказывается на росте осредненной температуры поверхности трубы со спиральными ребрами: от 135,8 до 160,5°C при $W = 7,4$ м/с, от 149,1 до 169,3°C при $W = 9,8$ м/с, от 164,1 до 178,1°C при $W = 14,7$ м/с. В среднем повышение массовой доли воды в парогазовой смеси от 0,188 до 0,41 и увеличение скорости движения смеси от 7,4 до 14,7 м/с приводит к росту осредненной температуры оребренной трубы на 11,8%.

Изменение массовой доли воды в парогазовой смеси от 0,188 до 0,41 приводит к

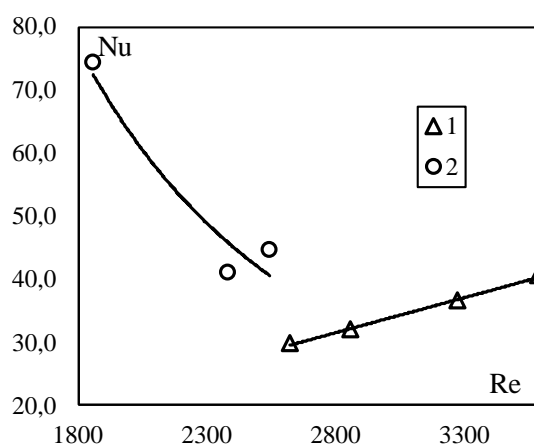


Рис. 6. Зависимость чисел Нуссельта от чисел Рейнольдса. 1 – Re=2600-3600; 2 – Re=1800-2600

росту доли теплового потока за счет конденсации парогазовой смеси на поверхности трубы со спиральными ребрами от 2,1 до 5,9% при скорости $W = 7,4$ м/с, от 2,2 до 6,1% при $W = 9,8$ м/с и от 2,3 до 6,4% при $W = 14,7$ м/с.

В среднем повышение массовой доли воды в парогазовой смеси от 0,188 до 0,41 и увеличение скорости ее движения от 7,4 до 14,7 м/с приводит к росту доли теплового потока за счет конденсации парогазовой смеси на поверхности оребренной трубы на 4,2%.

В четвертой главе предложена инженерная методика расчета восстановления от загрязнений поверхности теплообмена в условиях осаждения твердых частиц в теплообменном аппарате при конденсации парогазовой смеси.

Можно предположить механизм образования отложений, а именно частицы целлюлозы перемещаются к поверхности теплопередачи вместе с каплями конденсирующегося пара.

Представлен пример расчета эффективности удаления отложений. Если для поддержания теплового потока 50 кВт необходимо смывать отложения

каждые 6 часов, то для поддержания теплового потока в 200-300 кВт необходимо восстанавливать поверхность каждые 30 минут.

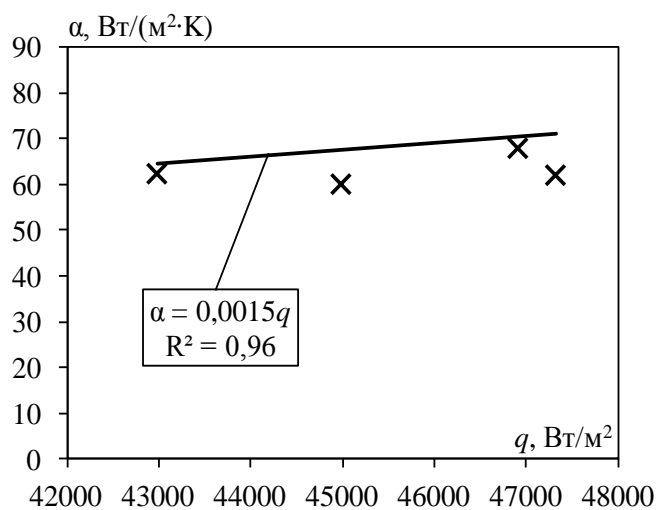


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности трубы со спиральными ребрами при конденсации пара на ней от плотности отбираемого теплового потока при $W = 14,7$ м/с: точки – экспериментальные данные, линия – моделирование

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны математические модели процесса образования отложений на поверхности цилиндрических и прямых ребер в теплообменных аппаратах при конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

2. На основе разработанной математической модели для цилиндрического ребра установлено, что с увеличением разности температур ребра и окружающей среды наблюдается увеличение теплового потока. В момент времени 60 суток при увеличении разности температур с 10 до 50°C тепловой поток увеличивается в 3,45 раза, а при повышении разности температур с 10 до 100°C – в 5,9 раз. Причем значительные изменения теплового потока наблюдаются в первые 10 суток.

3. Полученные данные позволили провести численное сравнение процессов теплообмена для труб с различным типом оребрения. Было установлено, что трубы со спиральным оребрением обеспечивают увеличение интенсивности теплоотдачи до 40% по сравнению с цилиндрическим оребрением.

4. Разработана и верифицирована трехмерная модель позволяющая рассчитывать характеристики тепло- и массообмена при движении воды при значениях температур близких к температурам кипения в переходном режиме течения.

5. Доказана применимость модели Ли для решения задач течения воды в трубопроводе при ее частичном испарении. При образовании пара необходимо

учитывать процессы испарения и конденсации, например по модели Ли, и проводить расчеты в нестационарном режиме.

6. Во всем рассматриваемом диапазоне исследований адекватные результаты получаются лишь при учете влияния температуры на такие параметры, как поверхностное натяжение, коэффициент теплопроводности воды, коэффициент динамической вязкости воды. Расхождение результатов в этом случае менее 6%.

7. Получена зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса для условий течения воды в диапазоне $Re = 2600-3600$, при ее нагреве до температур близких к температурам кипения.

8. Предложена инженерная методика, позволяющая рассчитать процесс восстановления оребренной поверхности теплообмена после загрязнений путём смывания отложений водой в теплообменном аппарате, установленном на промышленном объекте, занимающемся производством бумаги санитарно-гигиенического назначения и изделий тисью в России. Теплообменный аппарат был установлен компанией ООО «Филиал ВПМ», г. Казань.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы

1. Исследовать эрозионный износ теплообменных поверхностей с оребрением при конденсации парогазовых смесей с твердыми частицами. 2. Исследовать процесс образования отложений при несимметричной постановке задачи.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

В изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Якимов, Н. Д. Особенности решения задачи о конденсации пара, содержащего твёрдые частицы на ребре / Н. Д. Якимов, А. В. Дмитриев, **Г. Р. Бадретдинова**, С. Д. Борисова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 3. – С. 121–129.

2. **Бадретдинова, Г. Р.** Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы / Г. Р. Бадретдинова, И. Р. Калимуллин, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25. – № 2. – С. 176–186.

3. **Бадретдинова, Г. Р.** Конденсация парогазовой смеси с твердыми частицами на поверхности оребренных труб / Г. Р. Бадретдинова, Н. Д. Якимов, А. В. Дмитриев, И. Р. Калимуллин // Вестник МЭИ. – 2024. – № 3. – С. 72–77.

4. **Бадретдинова, Г. Р.** Теплоотдача при движении воды в трубе при температурах, близких к температурам кипения в переходном режиме / Г. Р. Бадретдинова, А. В. Дмитриев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2024. – № 5. – С. 42–51.

В изданиях, включенных в международную базу цитирования SCOPUS и Web of Science:

5. Dmitriev, A. V. Calculation of Sediment Formation on Finned Heat Exchanger Tubes on Condensation of a Vapor–Gas Mixture with Solid Particles / A. V. Dmitriev, N. D. Yakimov, V. V. Khar'kov, **G. R. Badretdinova** // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2023. – P. 1–8.

6. **Badretdinova, G. R.** Condensation of Water from a Vapor-Air Mixture on a Surface with Annular Round Straight Ribs of Constant Thickness / G. R. Badretdinova, O. S. Popkova, A. V. Dmitriev, I. R. Kalimullin // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2024. – P. 1–5.

Публикации в других изданиях и материалах конференций:

7. Дмитриев, А. В. Восстановление поверхности теплообмена в условиях ее загрязнения при конденсации парогазовой смеси / А. В. Дмитриев, **Г. Р. Бадретдинова**, С. Д. Борисова, А. Н. Николаев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 1. – С. 176–185.

8. Зинуров, В. Э Исследование теплообмена от парогазовой смеси при передаче тепла через ребристую поверхность / В. Э. Зинуров, А. Р. Галимова, **Г. Р. Бадретдинова**, И. В. Санников // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения): Материалы международной научно-технической конференции, Иваново, 02–04 июня 2021 года. Том II. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2021. – С. 241–243.

9. **Бадретдинова, Г. Р.** Восстановление теплопередающей поверхности при загрязнении твердыми частицами целлюлозы, содержащиеся в парогазовой смеси / Г. Р. Бадретдинова, А. В. Дмитриев, Г. Х. Гумерова // Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование: Международная научно-техническая конференция. Электронный сборник научных статей по материалам конференции В 3-х томах, Алматы, Казань, 20–21 октября 2022 года. Том 1. Казань: Казанский государственный энергетический университет. – 2023. – С. 15–21.

10. Семанина, Н.Д. Режим работы теплообменника в условиях его загрязнения при конденсации парогазовой смеси / Н. Д. Семанина, **Г. Р. Бадретдинова**, А. В. Дмитриев // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология : Материалы VI Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Казань, 24–26 мая 2022 года. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет. – 2022. – С. 237–240.

11. **Бадретдинова, Г. Р.** К расчету формирования осадка при конденсации на оребренных трубах теплообменника / Г. Р. Бадретдинова, В. В. Харьков, Н. Д. Якимов // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология: Материалы VI Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Казань, 24–26 мая 2022 года. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет. – 2022. – С. 307–309.

12. **Бадретдинова, Г. Р.** Влияние осадка на тепловой поток оребренной трубы / Г. Р. Бадретдинова, А. В. Дмитриев // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения) : Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета, Иваново, 31 мая – 02 2023 года. Том 2. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2023. – С. 181–183.

13. **Бадретдинова, Г. Р.** Промышленное внедрение рекуперативного теплообменного аппарата с ребристой поверхностью / Г. Р. Бадретдинова, А. А. Каюмова, Э. Р. Ханафеева // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов Двадцать восьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 17–19 марта 2022 года. – Москва: Общество с

ограниченной ответственностью «Центр полиграфических услуг «РАДУГА». – 2022. – С. 745.

14. **Бадретдинова, Г. Р.** Влияние геометрических размеров круглого ребра на тепловую эффективность теплообменника при конденсации парогазовой смеси / Г. Р. Бадретдинова // Бутаковские чтения: Сборник статей III Всероссийской с международным участием молодёжной конференции, Томск, 12–14 декабря 2023 года. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2023. – С. 162–164.

15. **Бадретдинова, Г. Р.** Конденсация парогазовой смеси с твердыми частицами на поверхности кольцевого круглого прямого ребра постоянной толщины / Г. Р. Бадретдинова // XXVII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика и 55-летию КГЭУ: материалы докладов, Казань, 05–06 декабря 2023 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет. – 2023. – С. 392–395.

16. **Бадретдинова, Г. Р.** Экспериментальное исследование рекуперативного теплообменного аппарата с ребристой поверхностью / Г. Р. Бадретдинова, А. А. Абдуллина, В. Э. Зинуров // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы Международной молодёжной научной конференции. Сборник докладов, Казань, 09–10 ноября 2023 года. Казань: ИП Сагиев А.Р. – 2023. – С. 961–965.

17. **Бадретдинова Г. Р.** Численное моделирование конденсации двухфазной смеси на оребренной поверхности теплообменного аппарата / Г. Р. Бадретдинова, В. Э. Зинуров, Т. Р. Якупов // Тинчуринские чтения – 2024 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалам Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах, Казань, 24–26 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет. – 2024. – С. 669–671.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681667 Российская Федерация. Программа для решения задач образования отложений на поверхности оребренных труб теплообменных аппаратов при конденсации парогазовой смеси / Н. Д. Якимов, **Г. Р. Бадретдинова**, А. В. Дмитриев; заявл. № 2024680683, 09.09.2024; опубл. 12.09.2024. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.09.2024

Подписано в печать 16.01.2025.

Формат 60x84^{1/16}. Печать цифровая.

Усл. печ. 0,93 л. Печ. 1,0 л. Тираж 100 экз. Заказ №4.

420111, Казань, Дзержинского, 9/1. Тел. сот.:8-9172-64-84-83

Отпечатано с готового оригинал-макета
в редакционно-издательском центре «Школа».

E-mail: ric-school@yandex.ru