

На правах рукописи



КРЫЛОВ Виктор Сергеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ
ВОДЯНОГО ПАРА ИЗ СМЕСИ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ
НЕКОНДЕНСИРУЮЩИХСЯ ГАЗОВ И РАЗРАБОТКА НА ЭТОЙ
ОСНОВЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО КОНДЕНСАТОРА**

2.4.7 – Турбомашины и поршневые двигатели
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Калуга – 2025

Работа выполнена на кафедре физики и математики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского», г. Калуга Калужской области.

Научный руководитель: Мильман Олег Ошеревич, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры физики и математики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского», г. Калуга.

Официальные оппоненты:

Морозов Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации - Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», г. Обнинск Калужской области,

Комаров Иван Игоревич, доктор технических наук, проректор по науке и инновациям, профессор Института энергоэффективности и водородных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится «19 июня» 2025 г. в 14.00 часов на заседании совета 75.1.001.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, созданного на базе Открытого акционерного общества «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» по адресу: Российская Федерация, 115280, г. Москва, ул. Ленинская Слобода, д. 23, стр. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ОАО «ВТИ» и на сайте организации, на базе которой создан совет по адресу:
<http://vti.ru/activities/dissertation-council/informaciya-o-zawite-dissertacij/>

Автореферат разослан «18» апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Д.В. Тарадай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Изучение тепло- и массообмена при конденсации определяется потребностями разработки современных технологий энергоэффективности и энергосбережения, создания теплообменных аппаратов для теплоутилизационных устройств, вакуумных и атмосферных конденсаторов газовых турбин парогазовых установок, где в паре содержится большая доля неконденсирующихся газов (НKG).

Одной из основных задач при проектировании конденсаторов является тепловой и гидравлический расчет теплообменных поверхностей. Для рационального проектирования необходимо глубокое понимание физических процессов, определяющих работу конденсационных аппаратов на парогазовой смеси (ПГС), и обоснованных методик их расчета.

Накопленные к настоящему времени теоретические и экспериментальные результаты позволили создать инженерные методики расчета, которые, однако, ориентированы на конкретные конструктивные решения и носят приближенный характер в силу сложности процессов и явлений, происходящих в реальных устройствах. Экспериментальные исследования, направленные на совершенствование этих методик – важный и актуальный задел.

Степень разработанности темы диссертации. В крупных монографических трудах и специальных исследованиях, проведенных Л.Д. Берманом, К.Э. Аронсоном, П.А. Березинцом, Л.А. Булысовой, В.И. Гладштейном, В.Г. Грибиным, Н.В. Зарубиной, А.Ю. Калинин, Н.Б. Карницким, И.И. Кирилловым, А.В. Клименко, А.В. Кондратьевым, М.В. Лазаревым, О.О. Мильманом, Ю.А. Радиным, А.Н. Рогалевым, В.А. Седниным, В.В. Сенецким, Б.М. Трояновским, А.Д. Трухнием, А.Г. Тумановским, В.А. Федоровым и др. раскрыты методологические и научно-теоретические основы концепции проектирования конденсационных установок современных энергетических машин, что позволяет в настоящее время успешно решать широкий спектр проблем научно-технической разработки, проектирования, эксплуатации, модернизации и совершенствования таких сложных технических систем, как работа конденсационных установок.

Поиску вариантов и способов совершенствования работы конденсационных установок посвящены работы российских и зарубежных ученых (К.Э. Аронсон, Ю.М. Бродов, И.И. Гогонин, В.И. Гомелаури, Г.И. Канюк, А.Ю. Картуесова, В.А. Меркулов, О.О. Мильман, В.А. Федоров, Г.Г. Шкловер, И.Б. Мурманский, M. Jovic, M. Lakovic, J. Bogdanovic–Jovanovic, M. Walker и др.).

Результаты фундаментальных исследований по сходной проблематике и тематике, выполненных в Национальном исследовательском университете

«МЭИ», Уральском федеральном университете имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина, Белорусском национальном техническом университете, Всероссийском дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехническом научно-исследовательском институте, Научно-производственном внедренческом предприятии «Турбокон» и др., убеждают в перспективности специального изучения процесса конденсации пара с большим содержанием неконденсирующихся газов. На основании полученных в результате диссертационного исследования данных в диссертации предложена новая инженерная методика расчета высокоэффективного конденсатора пара из парогазовой смеси.

Объект исследования: конденсаторы высокотемпературных газопаровых турбин с подачей пара в камеру сгорания, теплоутилизаторы котельных установок и т.п.

Предмет исследования – особенности работы конденсатора пара с большим содержанием неконденсирующихся газов.

Целью работы является разработка методики расчета высокоэффективных конденсаторов пара из парогазовой смеси на базе экспериментальных исследований тепло- и массообмена движущей парогазовой смеси.

Для достижения поставленной цели в настоящей работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

1) Проведены экспериментальные исследования по определению локальных и интегральных характеристик теплообмена при конденсации пара из движущей ПГС с высоким содержанием неконденсирующихся газов на горизонтальном трубном пучке в диапазонах:

- концентрации газовой компоненты (по массе) 0...20%;
- скорости парогазовой смеси 0...50 м/с;
- давления парогазовой смеси 5...100 кПа;
- температуры охлаждающей воды 15...50°C;
- коэффициента теплоотдачи к охлаждающей воде $(5...10) \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Получены локальные и средние значения коэффициентов теплоотдачи при конденсации пара из движущейся ПГС на всех режимах исследований.

2) Предложена аппроксимация экспериментальных данных в диапазоне режимов испытаний. Результаты исследований, выполненных на практически чистом паре, хорошо согласуются с известной зависимостью Л.Д. Бермана.

3) Разработана инженерная методика расчета высокоэффективного конденсатора пара из парогазовой смеси с большим содержанием неконденсирующихся газов.

4) Спроектирован, изготовлен и испытан модуль высокоэффективного конденсатора пара из ПГС; результаты испытаний подтвердили идею создания конденсатора ПГС с постоянной мощностью пара.

Методология и методы исследования. В организации и проведении диссертационного исследования реализована методология системного подхода к изучению сложных технических систем, соответствующая специфике изучаемой области. Глубокий анализ процессов конденсации в многокомпонентных системах, включающих парогазовые смеси с инертными составляющими, стал возможен за счет использования интегрированного системного метода при изучении сложных технических объектов. Выявленные в ходе работы фундаментальные закономерности и параметрические зависимости легли в основу инновационных инженерных решений, направленных на совершенствование эффективности конденсационного оборудования. Такой всесторонний подход позволил не только теоретически обосновать, но и практически реализовать оптимизационные мероприятия для повышения производительности конденсационных систем.

При анализе теплотехнических устройств использовались системные методы исследования. Комплексный подход и всесторонние методики моделирования были применены для разработки и исследования энергетических систем и их компонентов.

Диссертация выполнена по плану научной работы федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского», а также по плану совместной научной и инновационной деятельности университета и Закрытого акционерного общества «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон», соответствует приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации «Высокоэффективная и ресурсосберегающая экономика» и соотносится с перечнем важнейших наукоемких (критических) технологий, определенных Указом Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г.

Научная новизна исследования заключается в том, что в нем:

1) Впервые получены экспериментальные данные для определения коэффициента теплоотдачи при конденсации пара на горизонтальном трубном пучке из движущейся ПГС.

2) Разработана методика расчета коэффициента теплоотдачи от ПГС к стенке на фоне роста концентрации газов по мере конденсации пара.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что результаты проведенного диссертационного исследования вносят определенный вклад в понимание и теоретическое обоснование процессов тепломассообмена при эксплуатации конденсаторов паротурбинных установок с высокой концентрацией неконденсирующихся газов (до 15–20%). Эти выводы могут быть использованы для:

– повышения эффективности работы конденсаторов при высокой концентрации неконденсирующихся газов в паре;

– применения результатов исследования при проектировании установок, работающих по циклу Аллама и ОИВТ РАН.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. На основе проведенных экспериментов получены данные по интенсивности тепломассообмена при конденсации пара с содержанием до 20% неконденсирующихся газов на пучках гладких горизонтальных труб. Трубные пучки такого типа широко распространены на практике и являются неотъемлемой частью конструкции конденсаторов на действующих установках ТЭС и АЭС.

2. Методика расчета такого конденсатора позволяет оценить его эффективность в широком диапазоне тепловых нагрузок.

3. Проведенные исследования позволяют перейти к новым технологиям по созданию энергокомплексов большой мощности с ультрасверхкритическими параметрами пара на базе угольных котлов с газовым перегревом пара в выносных камерах сгорания, что исключительно важно для тепловых электростанций Российской Федерации.

Результаты испытаний и обобщение данных применимы к установкам типа Аллама и ОИВТ РАН, работающих на углекислом газе.

Личный вклад соискателя. Автор активно участвовал во всех этапах создания экспериментального стенда, начиная с постановки задач и планирования, организации и осуществления эксперимента. Он лично проводил эксперименты, осуществлял измерения, обработку результатов измерений и анализ полученных данных. Кроме того, он принимал участие в разработке инженерной методики для расчета высокоэффективного конденсатора пара.

Положения, выносимые на защиту:

1) Результаты экспериментального исследования процесса конденсации пара из движущейся ПГС на пучке горизонтальных труб.

2) Методика расчета коэффициента теплоотдачи от ПГС к стенке трубы на фоне роста концентрации газов по мере конденсации пара.

3) Инженерная методика расчета высокоэффективного конденсатора пара из парогазовой смеси.

4) Разработка, изготовление и испытание модуля высокоэффективного конденсатора пара из ПГС.

Достоверность научных результатов обеспечивается глубоким анализом процессов конденсации в многокомпонентных системах, включающих парогазовые смеси с инертными составляющими, и использованием интегрированного системного метода при изучении сложных технических объектов. Выявленные в ходе работы фундаментальные закономерности и параметрические зависимости легли в основу инновационных инженерных решений, направленных на совершенствование эффективности конденсационного

оборудования. Такой всесторонний подход позволил не только теоретически обосновать, но и практически реализовать оптимизационные мероприятия для повышения производительности конденсационных систем.

Достоверность результатов исследований подтверждается следующими положениями:

1) Разработкой методики исследований на основе приборной базы предприятия, имеющей требуемый уровень точности для измеряемых величин. Система менеджмента качества предприятия предусматривает и контролирует периодическое освидетельствование экспериментальных установок и использование базы приборов с обязательной поверкой в центре стандартизации и метрологии в соответствии с паспортом средств измерений, предусмотренным заводом-изготовителем.

2) Детальным анализом результатов измерений с обеспечением достоверных значений тепловых и материальных балансов; также выполнена оценка погрешностей измерений эксперимента, что позволяет сделать вывод о достоверности результатов измерений.

3) Подтверждением корректности математических моделей, соответствующих реальным физическим процессам, сравнением полученных результатов с расчетами, полученными ранее другими авторами при использовании классических методов.

4) Обсуждением экспериментальных данных на технических совещаниях предприятия и на следующих конференциях и семинарах:

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы были представлены и получили высокую оценку профессионального сообщества на 12 международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях: Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-7) (Москва, 2018 г.), III Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2018 г.), конференции Национального Комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена», XXII Школе-семинаре молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Москва, 2019 г.), III международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (МЭИ, г. Москва, 2020 г.), V Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2020 г.), XXIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Екатеринбург, 2021 г.), Международном симпозиуме «Устойчивая энергетика и энергомашиностроение – 2021: SUSE –

2021» (Казань, 2021 г.), Международной научно-практической конференции «Экология-Энергетика-Энергосбережение», посвященной 30-летию со дня образования НПП «Турбокон» (Калуга, 2021 г.); Восьмой Российской национальной конференции по тепломассообмену РНКТ-8 (МЭИ, 2022 г.); XXIV Школе-семинаре молодых учёных и специалистов «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Казань, 2023 г.).

По материалам диссертации опубликована 41 работа, в том числе 12 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК по научной специальности 2.4.7 – Турбомашины и поршневые двигатели. 10 научных статей опубликованы в изданиях, включенных в Белый список Минобрнауки России. 12 статей опубликованы в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science.

Диссертация является научно-квалификационной работой, **соответствует паспорту специальности 2.4.7 – Турбомашины и поршневые двигатели** в части направления исследования – пункту 2 «Разработка физико-математических программ, цифровых двойников, методов экспериментальных исследований, теоретические и экспериментальные исследования с целью повышения эффективности, надежности и экологичности рабочих процессов турбомашин, поршневых двигателей, их систем и вспомогательного оборудования в составе объектов применения».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 90 наименований, изложена на 172 страницах машинописного текста, содержит 37 рисунков, 14 таблиц и 3 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе приведен обзор технической литературы, посвященный исследованиям в области конденсации пара с содержанием неконденсирующихся газов, а также выполнен анализ существующих методик расчета конденсаторов паровых турбин.

В первом параграфе описан процесс конденсации практически чистого пара. Классическая задача о ламинарной пленочной конденсации неподвижного однокомпонентного пара на вертикальной поверхности и горизонтальной трубе была впервые решена В. Нуссельтом при ряде допущений, позволяющих значительно упростить краевую задачу (силы инерции в пленке

конденсата пренебрежимо малы, конвективный перенос и теплопроводность вдоль пленки несущественны по сравнению с теплопроводностью вдоль пленки, трение на границе раздела фаз не учитывается, температура внешней поверхности пленки равна температуре насыщенного пара, физические свойства конденсата постоянны). Средний коэффициент теплоотдачи для плоской вертикальной стенки:

$$\bar{\alpha} = \frac{3}{4} \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \cdot \rho_{\text{ж}}^2 \cdot r \cdot g}{4\mu\Delta T L}} \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности конденсата; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости (плотность пара считается намного меньше); r – удельная теплота парообразования; μ – динамическая вязкость жидкости; ΔT – разность температур стенки и внешней поверхности пленки; L – высота стенки.

В работах П.Л. Капицы, Д.А. Лабунцова, Г.Н. Кружилина дано уточнение теоремы Нуссельта с учетом неустойчивости пленки конденсата.

Расчеты теплоотдачи при конденсации неподвижного пара на гладких горизонтальных некруглых трубах показали их более высокую тепловую эффективность по сравнению с круглыми трубами. В работах Г.Г. Шкловера, В.П. Семенова описана математическая модель, учитывающая действие сил поверхностного натяжения, для расчета теплоотдачи при пленочной конденсации неподвижного пара на наклонных и вертикальных гладких трубах с поперечным сечением произвольной формы. Произведен расчет коэффициентов теплоотдачи и представлена гидродинамическая картина течения пленки конденсата по поверхности.

Обзор экспериментальных работ по конденсации пара на одиночном цилиндре и пакетах труб, выполненный Л.Д. Берманом, выявил существенные отклонения экспериментальных данных от теории Нуссельта: разброс составляет в пределах 75% для малых температурных напоров и в пределах 25% – для больших.

Во втором параграфе раскрываются особенности тепломассообмена при конденсации пара и парогазовой смеси. Задача о теплообмене при конденсации пара из ПГС в полной постановке должна рассматриваться как сопряженная задача конденсации и диффузии. Решение подобного рода задач удастся получить только в простейших случаях.

В работах Л.Д. Бермана, Л.С. Бобе приведены результаты экспериментального определения средних значений коэффициентов теплоотдачи при конденсации чистого пара и пара из паровоздушной смеси на вертикальных трубах крупномасштабной модели теплообменника. Предложены уравнения для расчета диффузионного коэффициента теплоотдачи при конденсации пара из паровоздушной смеси на внутренней поверхности труб.

В большинстве работ рассмотрена задача конденсации пара из смеси с небольшой конденсацией неконденсирующихся газов.

Таким образом, можно констатировать, что конденсация пара из движущей парогазовой смеси (ПГС с большим содержанием неконденсирующихся газов (НKG)) на пучке горизонтальных труб требует дальнейшего исследования применительно к расчету и проектированию аппаратов перспективных газопаротурбинных установок.

Во второй главе сформулирована основная идея и постановка задачи о конденсации пара из движущейся ПГС. Конденсация практически чистого движущегося пара исследована рядом авторов. Для оценки влияния скорости пара на коэффициент теплоотдачи при конденсации Л.Д. Берман ввел параметр $П = \frac{\rho_n w_n^2}{\rho_\kappa g d}$ (по сути – модифицированное число Фруда $Fr = \frac{w^2}{gd}$).

Обработка данных экспериментов и расчет теплообмена с использованием $П$ показывает сравнительно небольшое влияние скорости парового потока на коэффициент теплоотдачи практически чистого пара.

Для случая неподвижного пара этот процесс исследован неоднократно. Присутствие неконденсирующихся газов (НKG) в небольших концентрациях приводит к резкому снижению коэффициента теплоотдачи (Рисунок 1, а).

Качественная картина механизма подавления процесса конденсации пара из парогазовой смеси (ПГС) показан на рисунке 1, б): около поверхности теплообмена формируется диффузный слой НKG с концентрацией ν_κ , и теперь частица пара достигает поверхности пленки в результате диффузии через слой смеси с различной ν_κ , а интенсивность процесса зависит от градиента концентрации пара ν_n в этом слое.

В случае движущейся парогазовой смеси (Рисунок 1, в) динамическое воздействие потока на диффузионный слой НKG существенно изменяет его толщину и тем самым может резко увеличить абсолютную величину градиента концентрации пара и радикально интенсифицировать тепломассоперенос.

Получение данных экспериментов для такого процесса – основная задача настоящей работы. Таким образом предусмотрено экспериментальное исследование процессов тепломассообмена при конденсации движущейся парогазовой смеси с большим содержанием неконденсирующихся газов.

Разработан и создан экспериментальный стенд, позволяющий получить локальные коэффициенты теплоотдачи при конденсации пара из ПГС с большим содержанием НKG. Схема стенда приведена на рисунке 2. Смесь пара и воздуха поступает в паровой коллектор и подается в межтрубное пространство через выравнивающую решетку рабочего участка (РУ), обеспечивающую равномерное распределение пара в теплообменнике. Охлаждающая вода проходит внутри медных труб.

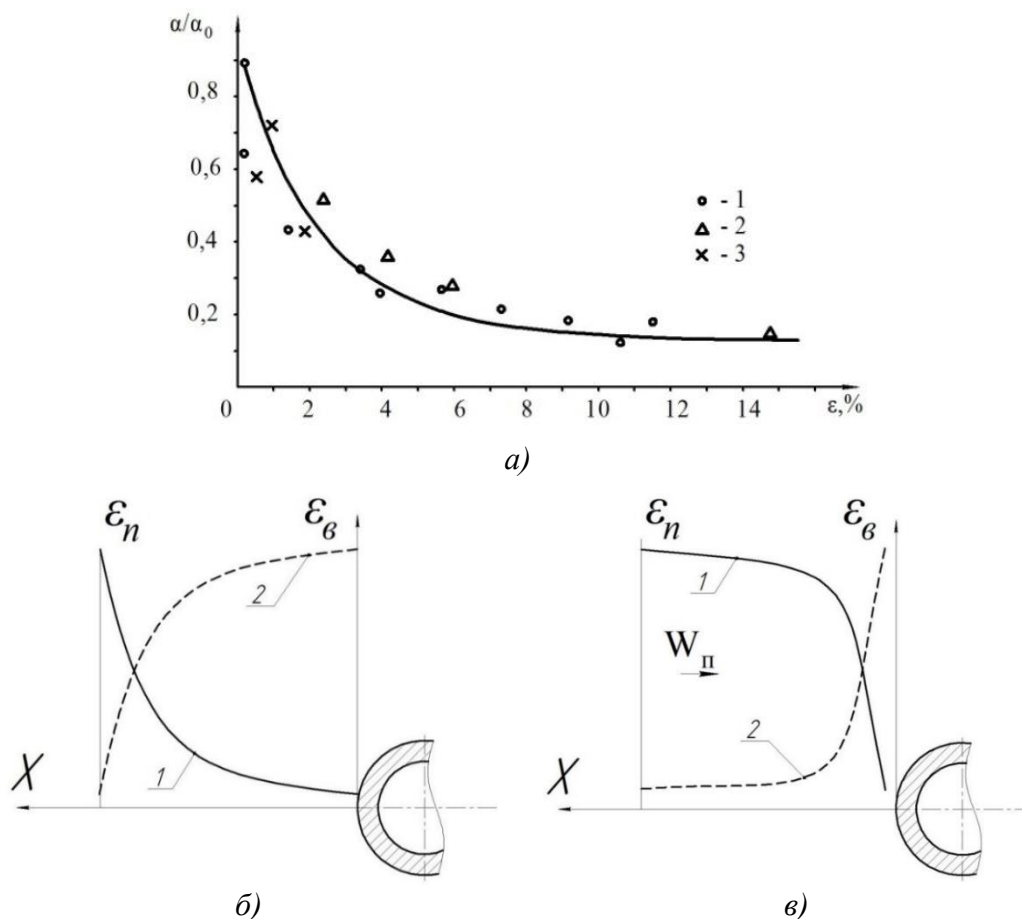


Рисунок 1 – Зависимость отношения коэффициентов теплоотдачи для неподвижной смеси водяной пар-воздух α и для чистого пара α_0 от концентрации воздуха при конденсации на горизонтальной одиночной трубе: 1 – данные Е.А. Лангена; 2 – данные В.А. Гудемчука; 3 – данные Д.Ф. Отмера (а); зависимость концентрации пара 1 и воздуха 2 около теплообменной трубы при конденсации пара из практически неподвижной ПГС (б) и при конденсации парогазовой смеси, движущейся со скоростью W_{Π} (в), от расстояния по нормали до поверхности цилиндра x

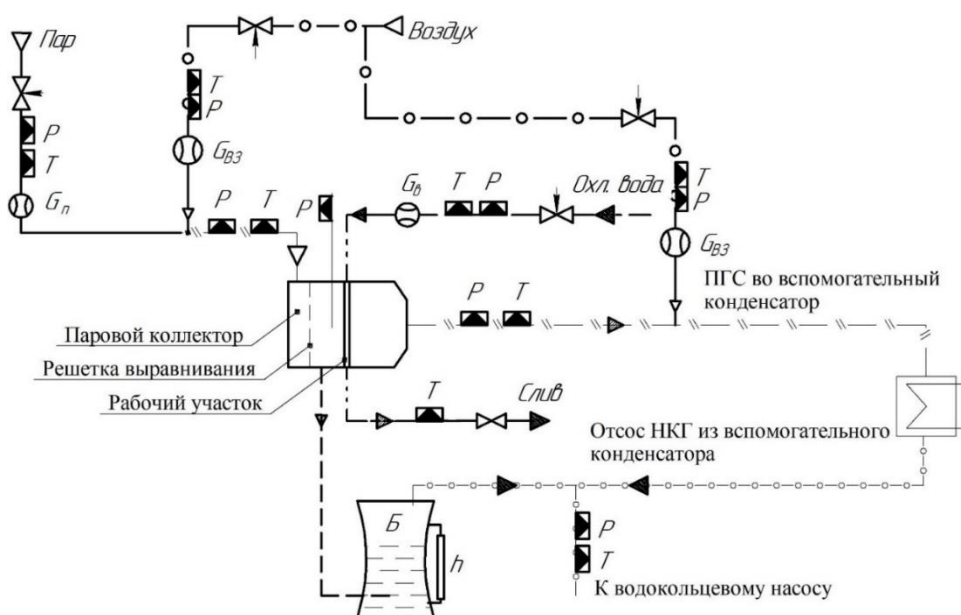


Рисунок 2 – Схема экспериментального стенда

В первых четырех рядах труб происходит гидравлическая стабилизация потока. На последних двух рядах осуществляется измерение температур стенок теплообменных труб с целью прямого определения коэффициентов теплоотдачи от движущегося пара к стенкам труб.

Для реализации режима с примерно постоянным значением параметра ρw^2 половина динамического напора при различных концентрациях воздуха на входе в РУ в линию отвода ПГС была врезана линия подачи воздуха с установленным на ней расходомером. Варьирование подачи воздуха до и после РУ позволило установить давление, расход пара и воздуха, соответствующие необходимому уровню значений параметра ρw^2 .

В рабочем участке пар конденсируется не полностью. Несконденсированный пар в смеси с воздухом выходит через выхлопной патрубок во вспомогательный конденсатор и систему отвода ПГС. Конденсат сливается через гидрозатвор в вакуумный бак Б. Величина давления в рабочем участке определяется вспомогательным конденсатором, где конденсируется большая часть пара.

Фотография стенда представлена на рисунке 13 диссертации (с. 48).

Выполнен ряд экспериментов с различными скоростями пара и значениями параметра ρw^2 на входе в конденсатор и различными концентрациями воздуха. Получены средние значения коэффициентов теплопередачи α при конденсации пара из движущейся ПГС в диапазоне значения $\rho w^2 = 0 \div 66$ Па и изменения объемной доли воздуха от 0 до 18%. На графике зависимости влияния объемной доли воздуха в паре на величину $\frac{\alpha}{\alpha_{Nu}}$ при конденсации пара из движущейся ПГС данные представлены в виде

соотношений $\frac{\alpha}{\alpha_{Nu}} = f(v_e)$ при $\rho w^2 = idem$.

Зависимость $\frac{\alpha}{\alpha_{Nu}} = f(v_e)$ (Рисунок 3) показывает, как увеличение содержания воздуха в ПГС снижает эффективность теплообмена при различных значениях параметра ρw^2 . При малых значениях параметра $\rho w^2 = 6$ Па и объемной доли содержания воздуха в ПГС $v_e = 0.06$ средний коэффициент теплоотдачи от пара снижается в 2 раза. При значениях параметра $\rho w^2 = 66$ Па и объемной доли содержания воздуха в ПГС $v_e = 0.06$ средний коэффициент теплоотдачи снижается в 1,3 раза.

Также были проведены исследования конденсации пара из движущейся парогазовой смеси, расширяющие область экспериментальных данных.

Исследования на практически чистом паре хорошо согласуются с зависимостью Л.Д. Бермана, использующей параметр $П = \frac{\rho_n w_n^2}{\rho_\kappa g d}$.

Все полученные данные, опираясь на формулу Л.Д. Бермана, можно аппроксимировать уравнением вида (2), обобщающим все экспериментальные данные с различными значениями параметра Π в диапазоне 0,03–0,26 (Рисунок 4 и 5):

$$\frac{\alpha}{\alpha_{Nu}} = 28,3\Pi^{0,08} Nu_w^{-0,58} (1 + 245\Pi)^{0,33} e^{-11\nu\Pi^{0,35}-0,84}. \quad (2)$$

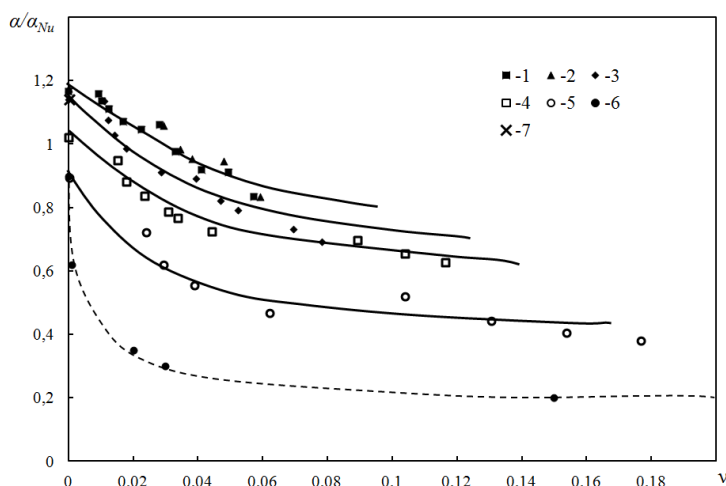


Рисунок 3 – Влияние объемной доли воздуха в паре на величину α/α_{Nu} при конденсации пара из движущейся паровоздушной смеси:

1 – $\rho w^2 = 66-64$ Па; 2 – $\rho w^2 = 61$ Па; 3 – $\rho w^2 = 40$ Па; 4 – $\rho w^2 = 22,5$ Па;
5 – $\rho w^2 = 9,5$ Па; 6 – $\rho w^2 = 0$, 7 – расчет α по Л.Д. Берману при $\nu = 0$

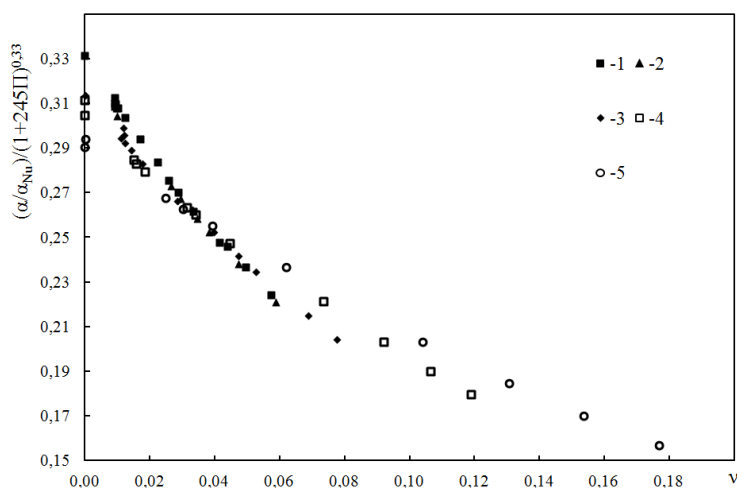


Рисунок 4 – Обобщение опытных данных по конденсации пара из движущейся паровоздушной смеси:
1 – $\Pi = 0,24-0,26$; 2 – $\Pi = 0,23-0,25$; 3 – $\Pi = 0,15-0,16$;
4 – $\Pi = 0,07-0,09$; 5 – $\Pi = 0,03-0,04$

В дальнейшем была принята к использованию другая форма обработки и обобщения экспериментальных данных

$$\frac{\alpha}{\alpha_B} = (1 + 0,74\Pi)(1 - 0,76\nu^{0,37}) \quad (3)$$

где $\alpha_B = 28,3\Pi^{0,08}Nu^{-0,58}\alpha_H$ – расчет по формуле Л.Д. Бермана для чистого движущегося пара.

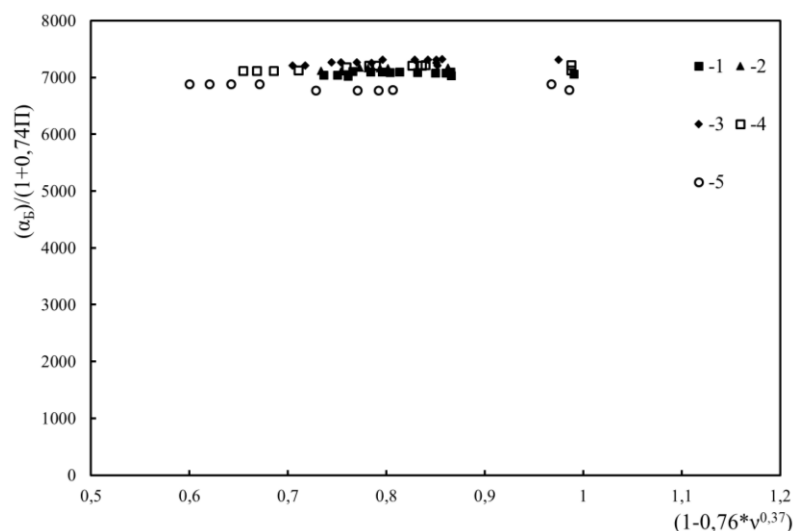


Рисунок 5 – Обобщение опытных данных по конденсации пара из движущейся паровоздушной смеси (2 вариант):

1 – $\Pi = 0,24 - 0,26$; 2 – $\Pi = 0,23 - 0,25$; 3 – $\Pi = 0,15 - 0,16$;

4 – $\Pi = 0,07 - 0,09$; 5 – $\Pi = 0,03 - 0,04$

Этот вариант обобщения имеет на 10% большую погрешность, но и большой диапазон вплоть до концентрации воздуха в паре $v \rightarrow 1$.

В третьей главе описано создание инженерной методики расчет высокоэффективного конденсатора пара с большим содержанием неконденсирующихся газов на основе полученных экспериментальных данных.

Общая идея высокоэффективного конденсатора – создание парового канала, поддерживающего постоянную скорость ПГС по мере конденсации пара.

Расчетная схема трубного пучка конденсатора с постоянной скоростью пара представлена на рисунке 6.

Целевой функцией являлась минимальная поверхность теплообмена при заданной степени конденсации пара в трубном пучке. Выполнены расчеты при варьировании параметрами: давлением на входе $5 \div 30$ кПа; температурой воды на входе $12 \div 30^\circ\text{C}$; скоростью воды в трубах $1 \div 4$ м; длиной труб $4 \div 12$ м и концентрацией НКГ на входе $1 \div 20^\circ\text{C}$ при заданном расходе ПГС 1 кг/с. Сделаны оценки влияния отложений на поверхности труб, которые неизбежны в процессе эксплуатации, а также точности расчета коэффициента теплопередачи на результаты расчета. Получены зависимости площади поверхности теплообмена от скорости и зависимости оптимальной скорости от переменного параметра. Оптимальное значение скорости ПГС лежит

в области значений более 40 м/с, что необходимо учитывать при проектировании конденсаторов для парогазовой смеси.

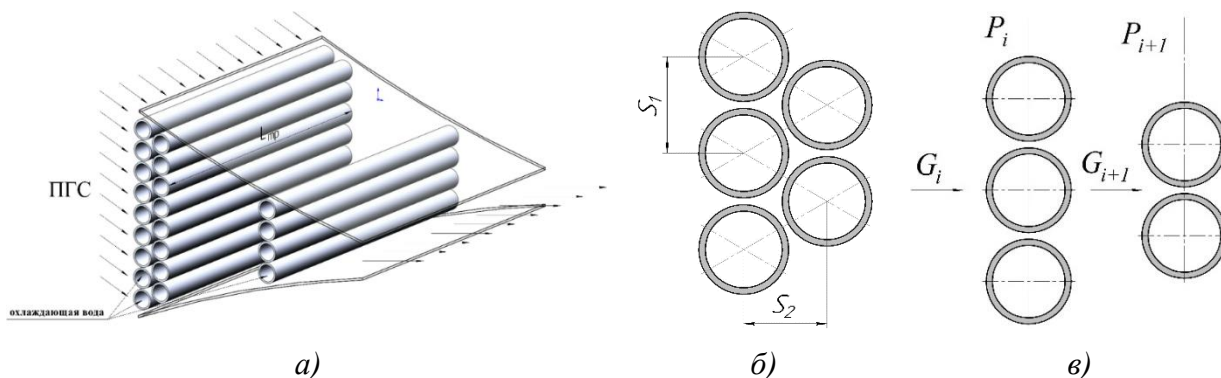


Рисунок 6 – Трубный пучок конденсатора с постоянной скоростью ПГС
а) компоновка парового канала; б) разбивка трубного пучка;
в) расчетные характеристики трубного ряда

Программа производит расчёт теплосъёма при конденсации пара на трубном пучке i -того ряда, тогда расход и параметры ПГС на входе $i+1$ ряда определены условиями работы i -того ряда, в частности,

– расход пара

$$G_{i+1} = G_i - \Delta G_i; \quad (4)$$

– давление ПГС

$$P_{i+1} = P_i - \Delta P_i; \quad (5)$$

– массовая концентрация НКГ

$$m_{i+1} = m_i \cdot \frac{G_i}{G_{i+1}} \quad (6)$$

Температура насыщения пара в смеси определяется при новом значении давления P_{i+1} и концентрации НКГ m_{i+1} .

Для корректности сопоставления результатов расчета при прочих равных условиях принят следующий порядок расчетов:

– производится расчет высокоэффективного конденсатора при заведомо большой скорости пара (например, 100 м/с);

– в результате этого расчета определяется предельная концентрация НКГ $\langle m_i \rangle$, которая может быть достигнута при такой скорости: эта концентрация определяется такой потерей давления, когда температура насыщения становится близкой к температуре охлаждающей воды на входе;

– все последующие расчеты выполняются с определением числа рядов (и, следовательно, поверхности теплообмена) до концентрации $\langle m_i \rangle$, т.е. все варианты имеют одинаковый теплосъем и одинаковую степень конденсации пара.

По результатам расчета строится график зависимости площади поверхности теплообмена от скорости парогазовой смеси и на графике

отсекается нижняя часть кривой, где площадь изменяется в пределах $[F_{\min}; 1,01F_{\min}]$.

На графиках рисунка 7 приведены зависимости площади поверхности теплообмена от скорости при изменении следующих параметров:

- давления на входе в интервале $5 \div 30$ кПа (Рисунок 7, а);
- температуры воды на входе в интервале $12 \div 30^\circ\text{C}$ (Рисунок 7, б);
- скорости воды в трубах в интервале $1 \div 4$ м (Рисунок 7, в);
- длины труб в интервале $4 \div 12$ м/с (Рисунок 7, г);
- концентрации НКГ на входе $1 \div 20^\circ\text{C}$ (Рисунок 7, д).

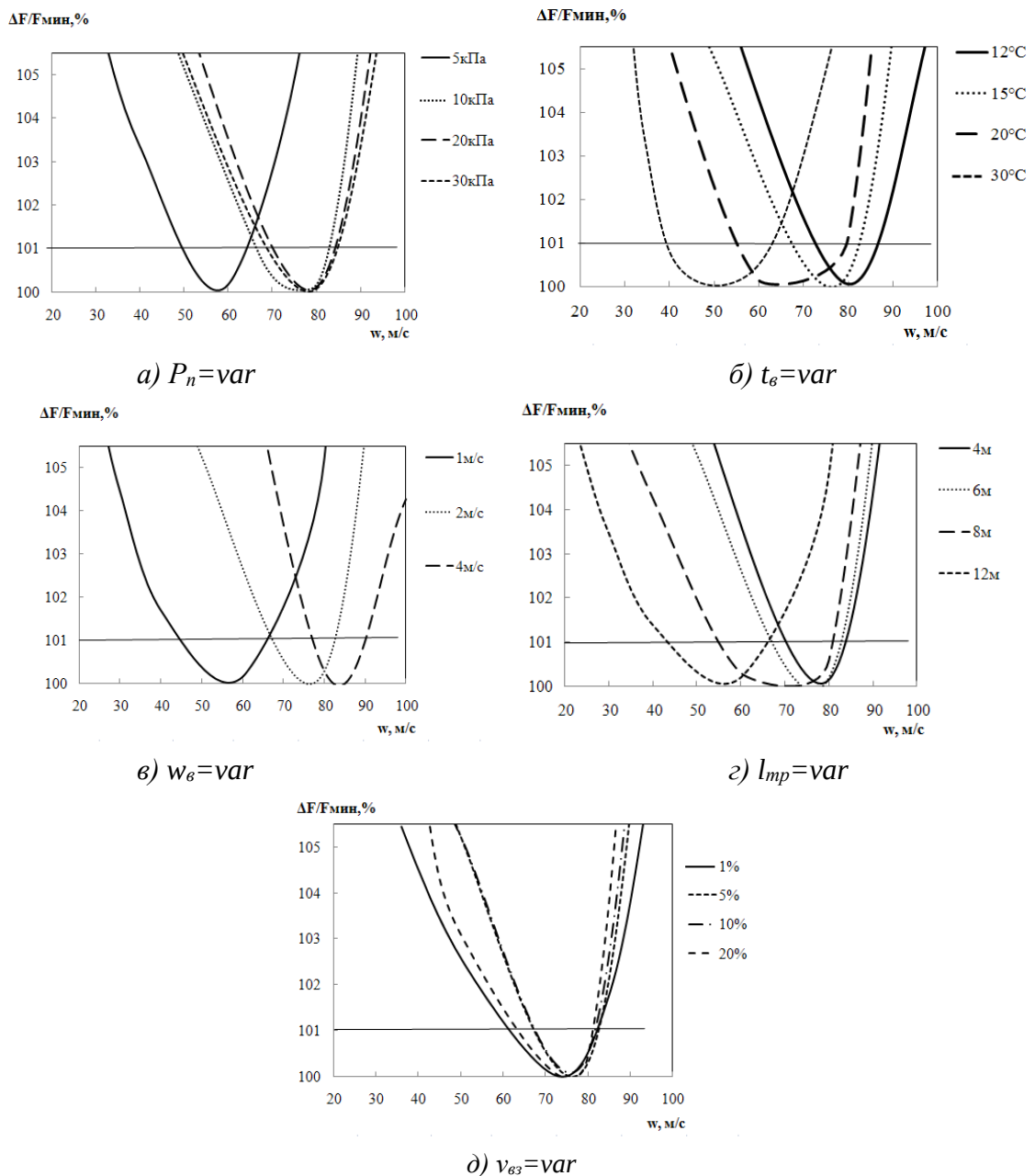


Рисунок 7 – Зависимости площади поверхности теплообмена от скорости ПГС

На рисунке 8 эти же данные обработаны в виде зависимости оптимальной скорости от переменного параметра.

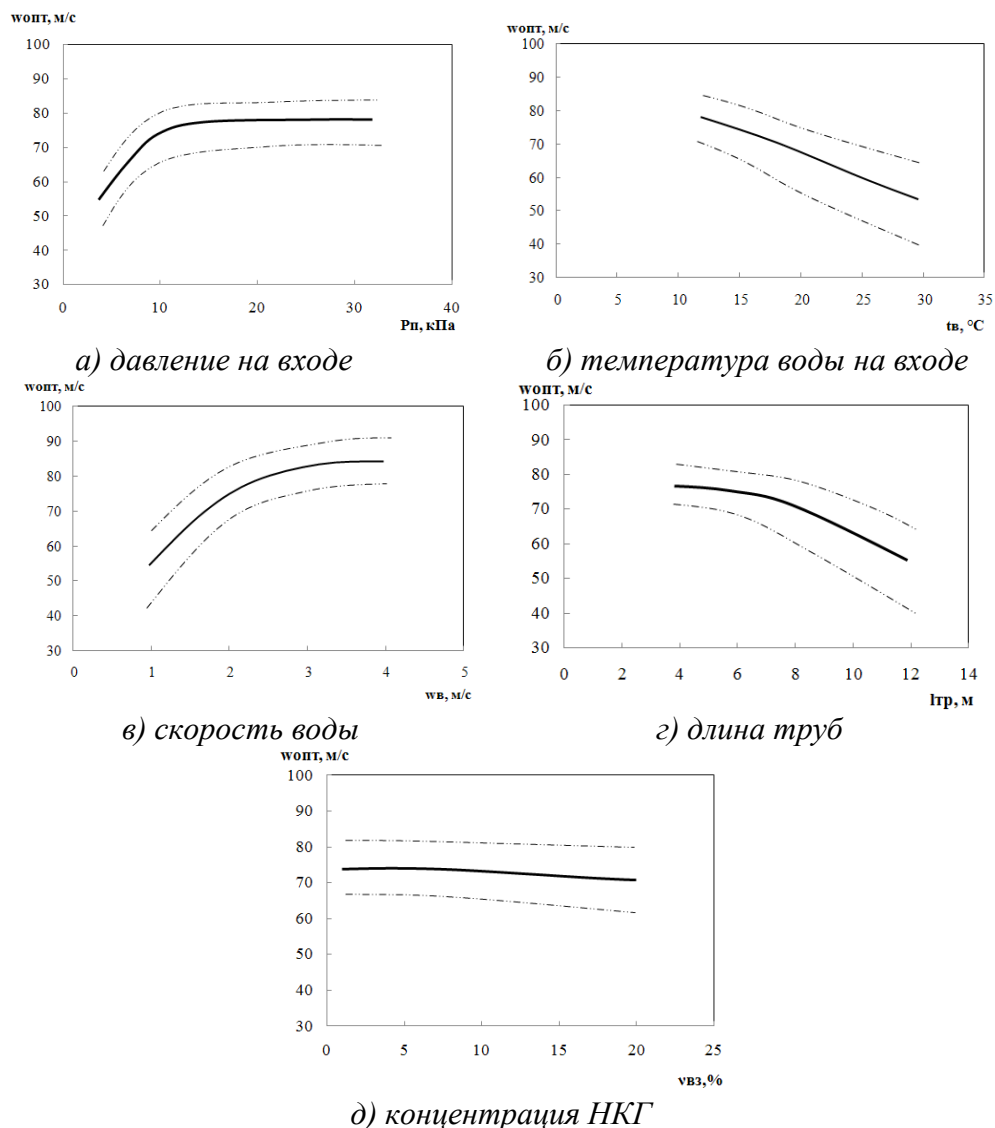


Рисунок 8 – Зависимости оптимальной скорости ПГС от переменного параметра

Рассматривая результаты расчета на рисунках 7, 8 необходимо учесть, что отклонение от оптимума скорости ПГС не только увеличивает поверхность теплообмена, но одновременно на столько же увеличивает расход охлаждающей воды. Иными словами, здесь оптимизация скорости имеет двойной эффект: не только площадь поверхности минимальна, но и минимален расход охлаждающей воды для достижения заданных параметров конденсации.

На рисунке 9 в приведенной зависимости w от давления $P_{п}$ на входе эти же данные представлены в координатах $w_{opt} = f(t_s - t_{в\text{ вх}})$ – разности температуры насыщения t_s и температуры воды на входе $t_{в\text{ вх}}$. Сопоставляя теперь этот график с рисунком 8, а, мы увидим фундаментальную причину уменьшения оптимальной скорости при снижении давления. Это уменьшение происходит тогда, когда разность $t_s - t_{в\text{ вх}}$ изначально мала и любая потеря давления, связанная с ростом скорости, существенно влияет на температурный напор теплопереноса, уменьшает теплосъем труб.

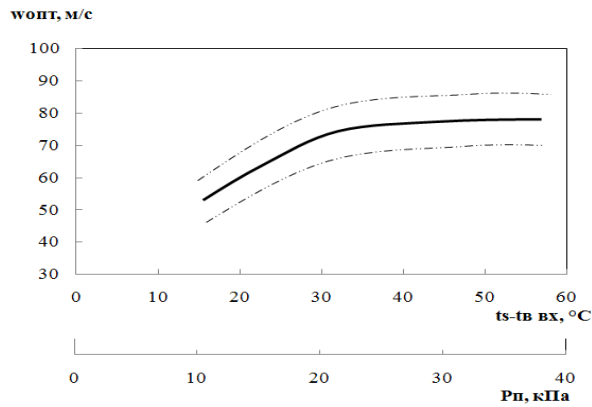


Рисунок 9 – Зависимость оптимальной скорости пара от температурной разности при разных значениях давления конденсации 5; 10; 20; 30 кПа

Существенное влияние скорости охлаждающей воды на $w_{\text{опт}}$ смеси объясняется следующим: до тех пор, пока коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к охлаждающей воде α_6 находится на уровне $8 \div 10 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{К}$ и более, основное влияние на коэффициент теплоотдачи идет от ПГС. Но при $\alpha_6 \leq 5 \div 6 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ интенсификации теплообмена за счет скорости ПГС становится не эффективной: растут потери давления, уменьшается t_s , а рост коэффициента теплопередачи от ПГС не компенсирует эти потери.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования модуля высокоэффективного конденсатора пара.

Рассчитанный по программе главы 3 высокоэффективный конденсатор пара представляет собой криволинейную призму с удлиненными боковыми гранями (Рисунок 10, а). При реализации такой конструкции неизбежны отклонения от расчетов, которые сопровождаются увеличением или уменьшением скорости парового потока по сравнению с расчетной величиной. В результате технологически обоснованных отклонений получен модуль, представлен на рисунке 9, б.

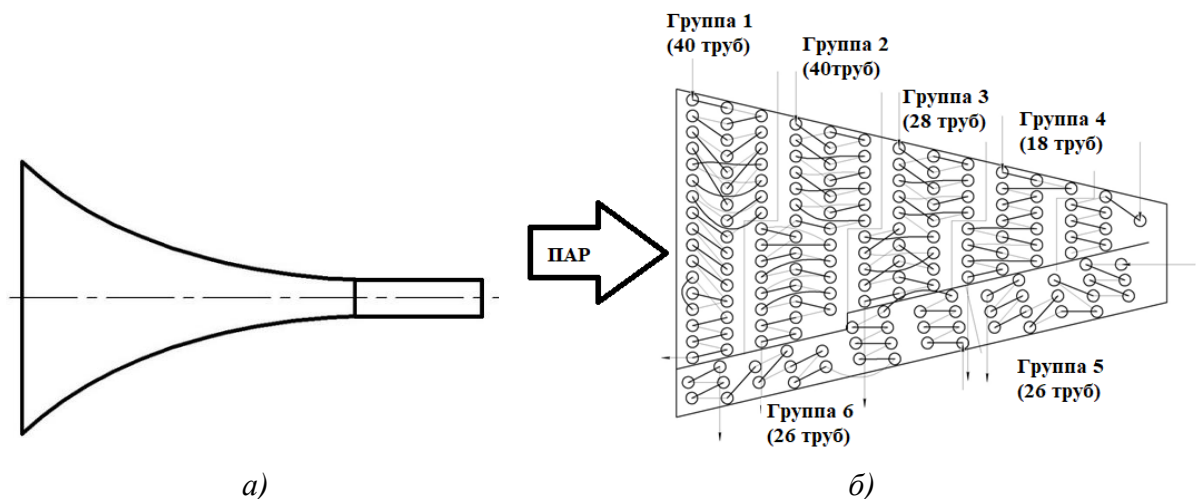


Рисунок 10 – Форма парового канала и трубного пучка ВЭК:
а) расчетный паровой канал; б) конструктивная схема трубного пучка

Он представляет собой трубный пучок, набранный из латунных труб диаметром 22×1 длиной 200 мм, развальцованных в трубных досках толщиной 25 мм. Пар проходит через 6 групп трубных пучков, каждый из которых имеет самостоятельный подвод и отвод охлаждающей воды. Все трубы в группе последовательно соединены между собой по воде, имитируя длинную теплообменную трубу.

Параметры трубных пучков по группам приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Площади теплообмена по группам труб

Группа	1	2	3	4	5	6	Общ.
Число труб	40	40	28	18	26	26	178
Площадь теплообмена, м ²	0,558	0,558	0,39	0,251	0,363	0,363	2,484

Трубные пучки сформированы таким образом, что теплообменный модуль образует треугольную форму. В дальнейшем это позволит собрать секцию конденсатора из нескольких теплообменных модулей необходимой суммарной тепловой мощности с контролем процессов тепломассопереноса в различных зонах трубного пучка.

Фотография модуля высокоэффективного конденсатора (ВЭК), расположенного на площадке машинного зала ТЭЦ ПАО «Калужский турбинный завод», представлена на рисунке 27 диссертации (с. 91).

Модуль испытан при конденсации ПГС с концентрацией воздуха на входе до $\sim 15\%$, изменение скорости охлаждения воды, плотности теплового потока до 55 кВт/м^2 .

Зависимость среднего коэффициента теплопередачи $\bar{k}$ от объёмной концентрации неконденсирующихся газов $\bar{v}$ приведена на рисунке 11. Из рассмотрения его следует, что модуль высокоэффективного конденсатора может обеспечить умеренное снижение $\bar{k}$ с $4400 \div 4600 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ до $2600 \div 2800 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ при изменении $\bar{v}$ от $\sim 0,5$ до 9% при номинальной тепловой нагрузке $q_{\text{ном}} = 80 \text{ кВт}$. Заметим, что обычный стационарный конденсатор при расчете по методике ОАО «ВТИ» (Л.Д. Берман) должен обеспечить $\bar{k} = 3200 \div 3500 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ при нормативной вакуумной плотности и температуре воды 25°C .

На рисунке 12 приведено распределение коэффициента теплопередачи по секциям при тепловой нагрузке, близкой к номинальной, и объёмной концентрации НКГ на входе $\sim 0 \div 7,5\%$. Из рассмотрения рисунка 11 следует, что при $\bar{v} \rightarrow 0$ все секции имеют высокий коэффициент теплопередачи $4200 \div 4600 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ (отнесённый к давлению на входе). Средний коэффициент теплопередачи с ростом $\bar{v}$ до $7,5\%$ уменьшится до $2500 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, последней

секции – до 1700 Вт/м²К, а секции 1–3 сохраняют высокие значения k не ниже 3200 Вт/м²К.

На рисунке 13 приведена зависимость среднего коэффициента теплопередачи $\bar{k}$ от скорости воды в трубах w_w конденсатора при нагрузке, близкой к номинальной. Существенная зависимость $\bar{k}$ от w_w свидетельствует о хорошей организации потока: теплообмен со стороны парогазовой смеси при $\bar{v} = 7,5\%$ не лимитирует рост $\bar{k}$. Экстраполируя график до $w_w = 2$ м/с, можно ожидать для относительно чистого пара $\bar{k} = 5000$ Вт/м²К, для $\bar{v} = 8\%$ прирост величины $\bar{k}$ будет более скромным.

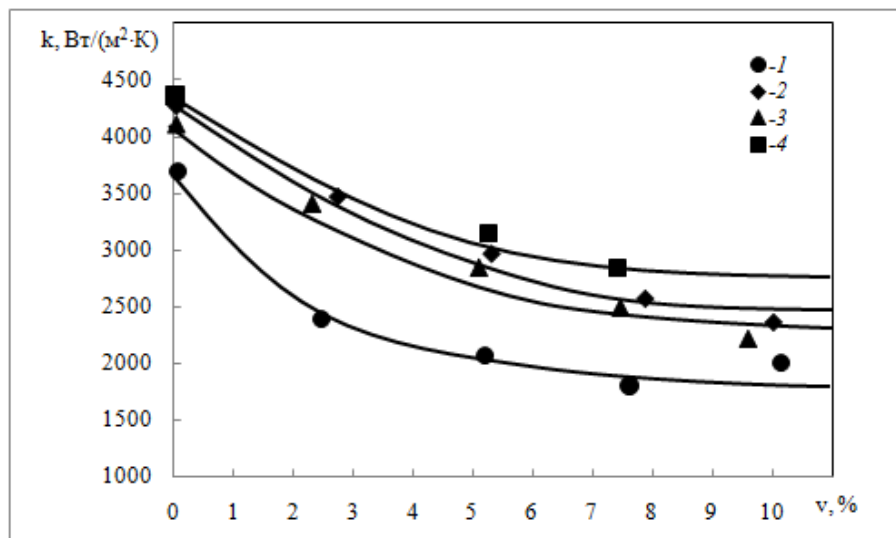


Рисунок 11 – Зависимость среднего КТП от концентрации воздуха на входе при различных нагрузках
1 – при нагрузке 0,62 қном; 2 – 0,78 қном; 3 – қном; 4 – 1,33 қном

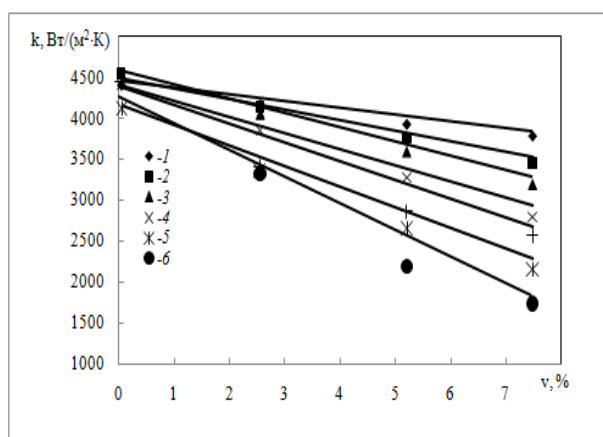


Рисунок 12 – Зависимость КТП групп труб от концентрации воздуха на входе при $q_{ном} = 41$ (кВт/м²),
1÷6 – номера групп по ходу пара

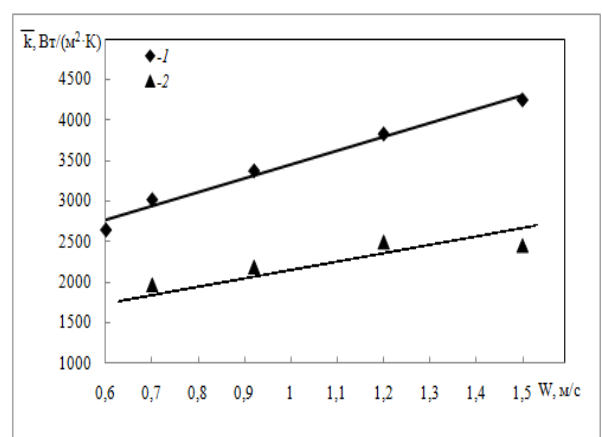


Рисунок 13 – Зависимость среднего КТП от скорости охлаждающей воды:
1 – концентрация НКГ $\bar{v} < 0,5\%$;
2 – $\bar{v} = 14,5\%$

На рисунке 14 приведена зависимость среднего коэффициента теплопередачи модуля от тепловой нагрузки для практически чистого пара при разных температурах охлаждающей воды. Переход от температуры $t_w=21-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ к $t_w=30-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивает $\bar{k}$ в среднем на 15% в зоне больших тепловых потоков $44\div 48\text{ кВт/м}^2$ и на $\sim 25\div 30\%$ в зоне малых $\sim 24\div 26\text{ кВт/м}^2$. Оценки влияния теплофизических свойств (рост коэффициента теплопроводности, уменьшение вязкости и числа Прандтля) с ростом температуры не объясняет улучшение работы конденсатора с ростом t_w . Причина этого явления, характерная для всех конденсаторов, лежит в соотношении характеристики устройства газоудаления и условий охлаждения. Внешним проявлением этого является уменьшение коэффициента теплопередачи при низкой температуре охлаждающей воды.

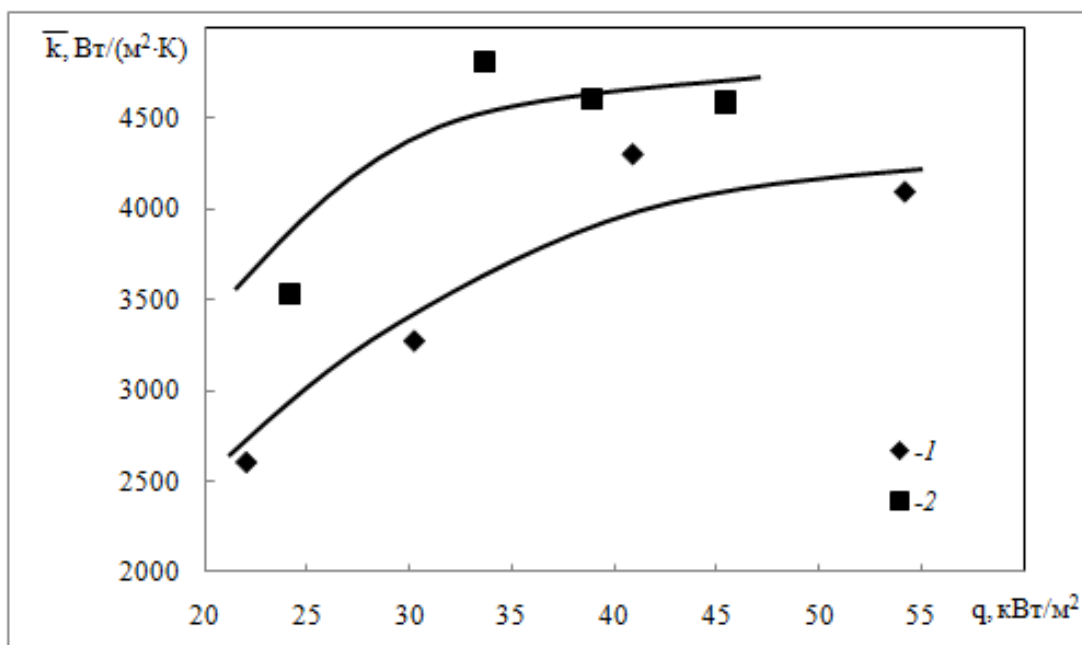


Рисунок 14 – Зависимость среднего КТП от плотности теплового потока при различных температурах охлаждающей воды (1 – $t_w=22,2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $t_w=31\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Результаты испытания модуля высокоэффективного конденсатора пара подтвердили заложенную в основу идею конструирования этих аппаратов.

С использованием программы расчета высокоэффективного конденсатора на параметры блока ПВК-150 расчетный трубный пучок ВЭК.

Для дальнейшей работы разработан модуль, разбивка труб его приведена на рисунке 35 и сборка модулей в секцию на рисунке 36 диссертации (с. 117–118).

Сопоставление расчетных характеристик конденсатора К-9115 и варианта ВЭК для блока ПВК-150 сделано в таблице 2.

Конфигурация парового пространства конденсатора для ПВК-150 приведена на рисунке 15.

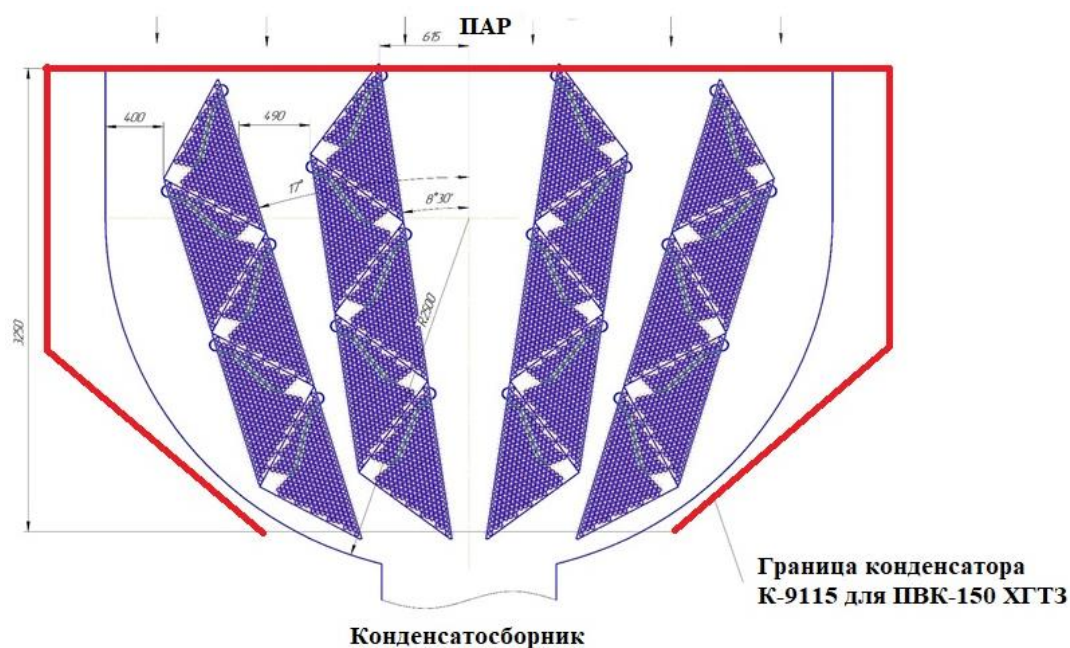


Рисунок 15 – Компоновка трубного пучка конденсатора пара ПВК-150

Таблица 2 – Сравнительные характеристики конденсатора К-9115 и ВЭК для блока ПВК-150 ХГТ2

Параметр	К9115	ПВК-150
Расход пара, т/ч	330	
Давление конденсации, кПа	4,8	
Температура воды на входе, °С	15	
Поверхность теплообмена, м ²	9115	6854
Число труб Ø28	11715	8810
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	21000	18850

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате исследования процессов конденсации пара при большом содержании неконденсирующихся газов были получены следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ научно-технической литературы по вопросам конденсации пара и парогазовой смеси, а также расчетов конденсационных аппаратов для этих сред. Показана актуальность исследования процесса конденсации парогазовой смеси с большим содержанием неконденсирующихся газов применительно к высокотемпературным установкам по циклу Аллама и ОИВТ РАН.

2. Разработан, изготовлен и введен в эксплуатацию экспериментальный стенд для исследования процесса конденсации парогазовой смеси с большим содержанием неконденсирующихся газов на шестирядном пучке

горизонтальных медных труб с термодатчиками, установленными в прямоугольных пазах на теплообменных трубах. Анализ погрешности в определении коэффициента теплоотдачи не превышает 10% от ее величины.

3. Проведены исследования по определению коэффициентов теплопередачи при конденсации пара из парогазовой смеси с объемной концентрацией неконденсирующихся газов ν до 18%, параметра ρw^2 от 0 до 66 Па в интервале давления 25–35 кПа. Результаты опытов обобщены безразмерной зависимостью

$$\frac{\alpha_{см}}{\alpha_Б} = (1 + 0,74П)(1 - 0,76\nu^{0,37}),$$

где $\alpha_Б = 28,3П^{0,08}Nu^{-0,58}\alpha_H$ – формула Л.Д. Бермана для чистого движущегося пара; $П = \frac{\rho_n w^2}{\rho_k g d}$ – модифицированное число Фруда; ρ_n , ρ_k – плотность пара и конденсата; w – скорость парогазовой смеси в узком сечении; d – диаметр трубы.

4. На основании экспериментальных данных и их обобщения разработана инженерная методика расчета парового канала высокоэффективного конденсатора парогазовой смеси с большим содержанием неконденсирующихся газов.

Методика учитывает влияние скорости пара и охлаждающей воды, геометрические характеристики трубного пучка и потери давления по ходу движения ПГС.

5. С использованием разработанной методики проведен расчет оптимальной скорости пара в зависимости от конфигурации трубного пучка, температуры и скорости охлаждающей воды, длины теплообменных труб и наличия отложений в этих трубах, величина оптимальной скорости пара лежит в диапазоне 40–60 м/с.

6. Разработана конструкция, изготовлен модуль высокоэффективного конденсатора и стенд для его испытаний на площадке ТЭЦ ПАО «Калужский турбинный завод».

Стенд и рабочий участок позволяют получить информацию по интенсивности теплопередачи как в целом по модулю, так и по отдельным его частям по ходу движения ПГС.

7. Испытания модуля высокоэффективного конденсатора пара, содержащего большое количество неконденсирующихся газов, проведено в диапазоне удельных тепловых нагрузок от 20 до 50 кВт/м², концентрации НКГ от ~0 до 10%, скорость воды до 2 м/с. Показано, что при концентрациях НКГ до 10% и номинальной тепловой нагрузке может быть достигнут средний коэффициент теплопередачи, равный 2600–2800 Вт/(м² · К) при скорости охлаждающей воды 1,5 м/с.

8. Получены зависимости коэффициента теплопередачи от скорости и температуры охлаждающей воды: для практически чистого пара достигнута величина $k = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при скорости воды 2 м/с и $3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при концентрации НКГ до 10%. При скорости охлаждающей воды 1,5 м/с средний коэффициент теплопередачи изменяется в диапазоне 2600–4600 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при изменении концентрации НКГ от 0,5 до 10%.

9. Приведен пример конструктивного исполнения конденсатора пара на базе модулей высокоэффективного конденсатора пара. В приведенных технических условиях использование разработанной методики инженерного расчета и проектирования может обеспечить экономию до 30% поверхности теплообмена по сравнению с существующим конденсатором.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Крылов, В.С. Высокоэффективный конденсатор пара из парогазовой смеси / В.С. Крылов, О.О. Мильман, А.В. Птахин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2017. – № 12. – С. 16-26. – DOI 10.1134/S0040363617120074 (авторство не разделено, 0,45 п.л.) (Белый список, ВАК РФ);

2. Крылов, В.С. Конденсация пара из движущейся парогазовой смеси / В.С. Крылов, О.О. Мильман, А.В. Птахин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2018. – № 12. – С. 71-77. – DOI 10.1134/S0040363618120068 (авторство не разделено, 0,3 п.л.) (Белый список, ВАК РФ);

3. Крылов, В.С. Исследование параллельной работы секций вакуумного конденсатора в условиях неравномерного охлаждения / В.С. Крылов, О.О. Мильман, А.Ю. Картуесова, Г.Г. Яньков [и др.] // Теплоэнергетика. – 2019. – № 2. – С. 5-12. – DOI 10.1134/S0040363619020024 (авторство не разделено, 0,4 п.л.) (Белый список, ВАК РФ);

4. Крылов, В.С. Численное моделирование конденсации пара при течении парогазовой смеси в канале переменного сечения с пучком гладких горизонтальных труб / В.С. Крылов, К.Б. Минко, В.И. Артемов, Г.Г. Яньков // Теплоэнергетика. – 2019. – № 12. – С. 68-76. – DOI 10.1134/S0040363619120063 (авторство не разделено, 0,4 п.л.) (Белый список, ВАК РФ);

5. Крылов, В.С. Верификация математической модели пленочной конденсации пара из движущейся паровоздушной смеси на пучке из гладких горизонтальных труб / В.С. Крылов, К.Б. Минко, В.И. Артемов, Г.Г. Яньков // Теплоэнергетика. – 2019. – № 11. – С. 43-51. – DOI 10.1134/S0040363619110031 (авторство не разделено, 0,4 п.л.) (Белый список, ВАК РФ);

6. Крылов, В.С. Влияние характера течения охлаждающей среды на работу теплообменников с конденсацией пара внутри труб / В.С. Крылов, О.О. Мильман, С.А. Исаев, А.В. Птахин [и др.] // Инженерно-физический

журнал. – 2020. – Т. 93, № 5. – С. 1115-1125 (авторство не разделено, 0,5 п.л.) (Белый список);

7. Крылов, В.С. Инженерная модель конденсации пара из движущейся парогазовой смеси на поверхности пучка из гладких горизонтальных труб / В.С. Крылов, К.Б. Минко, Г.Г. Яньков, В.И. Артемов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2021. – № 9. – С. 51-63. – DOI 10.1134/S0040363621080063 (авторство не разделено, 0,6 п.л.) (Белый список, ВАК РФ);

8. Крылов, В.С. Оптимизация параметров высокоэффективного конденсатора пара из парогазовой смеси с большим содержанием неконденсирующихся газов / В.С. Крылов, О.О. Мильман, А.Ю. Картуесова [и др.] // Теплоэнергетика. – 2021. – № 12. – С. 62-67. – DOI 10.1134/S0040363621120067 (авторство не разделено, 0,3 п.л.) (Белый список, ВАК РФ);

9. Крылов, В.С. Экспериментальные исследования дополнительного газового перегрева пара в камере сгорания метанокислородного топлива / О.О. Мильман, В.С. Крылов, А.В. Птахин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2023. – № 2. – С. 24-31. – DOI 10.56304/S0040363623020054 (авторство не разделено, 0,3 п.л.) (Белый список, ВАК РФ);

10. Крылов, В.С. Экспериментальное исследование характеристик сопл Лавалья для реактивных турбин / В.С. Крылов, О.О. Мильман, А.С. Голдин, Б.А. Шифрин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2023. - № 12. – С. 138-157ю – DOI: [10.56304/S0040363624010065](https://doi.org/10.56304/S0040363624010065) (авторство не разделено, 0,9 п.л.) (Белый список, ВАК РФ);

11. Крылов, В.С. Моделирование характеристик при истечении недогретой жидкости из геометрически подобных сопл Лавалья / В.С. Крылов, О.О. Мильман, А.С. Голдин, В.Б. Перов [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2024. – Т. 97. - № 5. – С. 1301-1315 (авторство не разделено, 0,2 п.л.) (Белый список),

12. Крылов, В.С. Перспективные технологии сухого охлаждения для реакторов малой и средней мощности / В.С. Крылов, О.О. Мильман, А.В. Птахин, А.Ю. Картуесова [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2024. - № 3. – С. 279-293 (авторство не разделено, 0,6 п.л.) (ВАК РФ);

13. Krylov, V.S., Milman, O.O., Kartuesova, A.Y., Ptakhin, A.V. [et al.] (2019). Investigation of Parallel Operation of Vacuum Condenser Sections with Nonuniform Cooling. Thermal Engineering. Vol. 66. No. 2. P. 77-83. – DOI 10.1134/S0040601519020022 (авторство не разделено, 0,25 п.л.);

14. Krylov, V.S., Minko, K.B., Artemov, V.I., Yan'kov, G.G. (2019). Numerical Simulation of Steam Condensation in a Steam-Gas Mixture Flow in a Variable-Section Channel with a Bundle of Smooth Horizontal Tubes. Thermal

Engineering. Vol. 66. No. 12. P. 928-935. – DOI 10.1134/S0040601519120061 (авторство не разделено, 0,3 п.л.);

15. Krylov, V.S., Minko, K.B., Artemov, V.I., Yan'kov, G.G. (2019). Verification of the Mathematical Model of Steam Film Condensation from a Flowing Steam-Air Mixture on a Bundle Made of Horizontal Tubes. Thermal Engineering. Vol. 66. No. 11. P. 804-811. DOI 10.1134/S004060151911003X (авторство не разделено, 0,25 п.л.);

16. Krylov, V.S., Mil'man, O.O., Isaev, S.A., Ptakhin, A.V. [et al.] (2020). Influence of Cooling Medium Flow Character on the Operation of Heat Exchangers with Steam Condensation Inside Tubes. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Vol. 93. No. 5. P. 1077-1088. – DOI 10.1007/s10891-020-02208-2 (авторство не разделено, 0,9 п.л.);

17. Krylov, V.S., Milman, O.O., Ptahin, A.V., Yankov, G.G. (2020). High efficiency steam-gas mixture condenser. Journal of Physics: Conference Series : 3, Moscow, October, 19–23, 2020. Moscow. P. 042074. – DOI 10.1088/1742-6596/1683/4/042074 (авторство не разделено, 0,3 п.л.);

18. Krylov, V. S., Minko, K. B., Yan'kov, G. G., [et al.] (2021). An Engineering Model of Steam Condensation from a Flowing Steam-Gas Mixture on a Bundle Made of Horizontal Tubes. Thermal Engineering. Vol. 68. No. 9. P. 705-716. – DOI: 10.1134/S0040601521080061 (авторство не разделено, 0,55 п.л.);

19. Krylov, V.S., Mil'man, O.O., Kartuesova, A.Y., [et al.] (2021). Optimizing Parameters of a High-Efficiency Steam Condenser from a Steam-Gas Mixture with a Large Content of Noncondensing Gases. Thermal Engineering. Vol. 68. No. 12. P. 930-935. DOI: 10.1134/S0040601521120065 (авторство не разделено, 0,3 п.л.);

20. Krylov, V.S., Kartuesova, A.Y., Ptakhin, A.V. (2022). Study of the Orifice Inserts Influence on the Multisection Vacuum Condenser Operation Under Uneven Heating Conditions. Lecture Notes in Mechanical Engineering. P. 179-187. DOI: 10.1007/978-981-16-9376-2_18 (авторство не разделено, 0,4 п.л.);

21. Krylov, V.S., Milman, O.O., Ptakhin, A.V., Brdynkevich, D.V., Lenev, S.N., Vivchar, A.N., Nikishov, K.S., Taktashev, R.N (2023). Experimental Study of Additional Gas Superheating of Steam in a Combustion Chamber Fired with Mathane-O[ygen Fuel. Thermal Engineering. Vol. 70. No. 2. Pp. 97-103. DOI: [10.1134/s0040601523020052](https://doi.org/10.1134/s0040601523020052) (авторство не разделено, 0,3 п.л.);

22. Krylov, V.S., Milman, O.O., Ptakhin, A.V., Perov, V.B., Yankov, G.G., Kondratyev, A.V., Zheleznov, A.P., Zhinov, A.A. (2023). A Study of R113 Refrigerant Boiling Processes in a Horizontal Tube Bundle under High Heat Flux Conditions. Thermal Engineering. Vol. 70. No. 8. Pp. 595-602. DOI: [10.1134/s0040601523080062](https://doi.org/10.1134/s0040601523080062) (авторство не разделено, 0,3 п.л.);

23. Krylov, V.S., Milman, O.O., Goldin, A.S., Shifrin, B.A., Perov, V.B., Serezhkin, L.N., Ptakhin, A.V., Kartuesova, A.Yu. (2023). Experimental Investigation into Performance of Laval Nozzless for Reaction Turbines. Thermal Engineering. Vol. 70. No. 12. Pp. 1083-1101. DOI: [10.1134/s0040601524010063](https://doi.org/10.1134/s0040601524010063) (авторство не разделено, 0,8 п.л.);
24. Krylov, V.S., Milman, O.O., Goldin, A.S., Shifrin, B.A., Perov, V.B., Ptakhin, A.V., Kondratyev, A.V. (2024). Modeling the Characteristics during the Flow of a Subcooled Liquid out of Geometrically Similar Laval Nozzles. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2024. Vol. 97. No. 5. Pp. 1296-1312. DOI: [10.1007/s10891-024-03003-z](https://doi.org/10.1007/s10891-024-03003-z) (авторство не разделено, 0,7 п.л.).

Подписано в печать 14.04.2025. Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 63

Открытое акционерное общество
«Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени
Теплотехнический научно-исследовательский институт»
Российская Федерация, 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14