

большим содержанием неконденсирующихся газов происходит в зоне воздухоохладителя обычного парового конденсатора. При этом на заводах изготовителях конденсаторов для паровых турбин отдельных расчетов зоны воздухоохладителя не проводятся.

Проблема рационального проектирования конденсационных аппаратов для парогазовой смеси рассмотрена автором с учетом достижений современной отечественной и зарубежной науки, имеющегося инновационного опыта работы, научно-технического совершенствования оборудования для предприятий энергетического комплекса.

В диссертации Крылова В.С. разработана методика расчета конденсаторов для конденсации пара с высоким содержанием неконденсирующихся газов. На основе результатов экспериментальных исследований тепло- и массообмена движущей парогазовой смеси предложена зависимость для оценки коэффициента теплоотдачи с паровой стороны при концентрации газовой неконденсирующейся компоненты (по массе) от 0 до 18%. Спроектирован, изготовлен и испытан модуль высокоэффективного конденсатора пара из ПГС; результаты испытаний подтвердили целесообразность идеи создания конденсатора с постоянной скоростью ПГС.

2. Общая характеристика диссертации

Диссертация включает в себя введение, 4 главы, заключение и библиографический список из 90 наименований. Общий объем текста диссертации составляет 172 страницы, включая 63 рисунка, 11 таблиц и 13 страниц приложения.

Во введении автором приводится обоснование актуальности темы диссертации, изложены научная новизна, цели и задачи исследования, теоретическая и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору научно-технической литературы по исследованию конденсации пара с высоким содержанием неконденсирующихся газов и анализу методик расчета конденсаторов ПТУ. Рассмотрены особенности расчета теплообмена и наиболее важных параметров, влияющих на конденсацию пара из парогазовой смеси, в частности, скорости пара; выполнена постановка задачи.

Во второй главе диссертации автором определена основная идея исследования. Показано, что присутствие неконденсирующихся газов (НКГ) в небольших концентрациях приводит к резкому снижению коэффициента теплоотдачи. Автор указывает на то, что в отличие от случая неподвижного пара, который исследован неоднократно, теплофизические процессы при конденсации движущейся парогазовой смеси с большим содержанием неконденсирующихся газов нуждаются в дополнительном исследовании.

Подробно изложено описание экспериментального стенда и рабочего участка конденсатора пара для получения локальных коэффициентов теплоотдачи при конденсации пара из ПГС с большим содержанием НКГ. Приведено описание методики измерений и обработки экспериментальных данных. Получены средние значения коэффициентов теплопередачи в достаточно широком диапазоне при скоростном напоре от 0 до 66 Па и изменении объемной доли воздуха от 0 до 18%. Выполнен анализ и обобщение, которые показали хорошее согласование при конденсации чистого пара с известной зависимостью Л.Д. Бермана.

Приведена аппроксимация экспериментальных данных для дальнейшего использования в расчетах и определены погрешности измерений: приборная, среднеквадратичная, случайная и пр.

В третьей главе автор изложил методику расчета высокоэффективного конденсатора пара с большим содержанием неконденсирующихся газов. Методика базируется на экспериментальных данных и позволяет выполнить расчет

оптимальной скорости пара в конденсаторе с большим содержанием неконденсирующихся газов и минимальной поверхностью теплообмена при заданной степени конденсации пара в трубном пучке.

Методика позволяет выполнить оценку влияния различных параметров (длины трубок, давления пара на входе в конденсатор, температуры воды на входе, скорости воды, концентрации НКГ и пр.) на результаты расчета. Получены зависимости площади поверхности теплообмена от скорости ПГС и зависимости оптимальной скорости от геометрических и режимных параметров конденсатора.

Четвертая глава посвящена разработке, изготовлению и испытанию экспериментального образца модуля высокоэффективного конденсатора. Конденсатор выполнен треугольным с уменьшением площади проходного сечения для ПГС и конфигурацией, позволяющей поддерживать примерное постоянство скорости парогазовой смеси по мере конденсации пара. Приведено описание экспериментального стенда и результатов исследований по определению коэффициента теплопередачи. Подробно изложена методика проведения и обработки результатов испытаний.

Получены значения коэффициента теплопередачи в зависимости от скорости охлаждающей воды, плотности теплового потока, содержания воздуха.

Автор подчеркивает, что помимо поддержания на высоком уровне скорости пара, важен выбор газоудаляющего устройства для обеспечения высокой эффективности конденсатора пара с большой концентрацией неконденсирующихся газов.

Автором предложен пример конструктивного оформления высокоэффективного конденсатора пара для турбины К-150-130 ХТЗ, который может обеспечить экономию до 30% поверхности теплообмена по сравнению с существующим конденсатором.

Выводы по работе в целом отражают цель исследований и положения, выносимые на защиту.

3. Научная новизна диссертации

Научная новизна исследования заключается в том, что в нем:

- впервые получены экспериментальные данные для определения коэффициента теплоотдачи при конденсации пара на горизонтальном трубном пучке из движущейся ПГС с высоким содержанием неконденсирующихся газов. Показано существенное влияние скорости ПГС на коэффициент теплоотдачи с паровой стороны;

– проведены исследования и разработана методика расчета конденсатора с конденсацией пара из ПГС и постоянной скоростью движения смеси.

4. Теоретическое значение полученных результатов

Результаты выполненной автором работы пополняют теоретический объем знаний по предмету исследования - процессам теплообмена при эксплуатации конденсаторов паротурбинных установок с высокой концентрацией неконденсирующихся газов (до 15–20%). Внедрение полученных результатов позволит расширить направления решений в теоретической сфере в части повышения эффективности работы конденсаторов при высокой концентрации неконденсирующихся газов в паре. Кроме того, выполненные исследования позволят рассчитывать зону воздухоохладителя обычных паровых конденсаторов серийных турбин.

5. Практическая ценность полученных результатов

Практическую значимость исследования определяют результаты, использование которых способствует переходу к новым технологиям по созданию энергокомплексов с сжиганием топлива в среде рабочего тела, что исключительно важно для энергетической отрасли Российской Федерации.

6. Степень достоверности и апробация результатов

Работа имеет высокую степень достоверности благодаря структурному подходу к процессу проведения испытаний и качеству измерений. Это подтверждается наличием приборной базы, имеющей необходимый уровень точности для проведения измерений, системы мониторинга для регулярного освидетельствования экспериментальных установок и приборной базы, обеспечение достоверных значений тепловых и материальных балансов и грамотной оценки погрешностей измерений эксперимента.

Все результаты исследования опубликованы в центральной рецензируемой печати и неоднократно обсуждались на различных конференциях и совещаниях.

В работе отсутствует заимствованный материал без ссылки на авторов и источник заимствования, а также отсутствуют результаты научных работ, выполненных соискателем в соавторстве, без ссылок на соавторов.

Работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» и соглашением о предоставлении гранта № 17-19-01604 от 24.05.2017 г. на тему: «Экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование процессов теплообмена при конденсации парогазовой смеси с большим содержанием неконденсирующихся газов на гладких и оребренных трубах».

7. Соответствие содержанию диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.4.7 - Турбомашин и поршневые двигатели (технические науки): 2. Разработка физико-математических моделей, пакетов прикладных 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.

8. Замечания и вопросы по содержанию диссертации

Основные положения диссертации не вызывают существенных возражений. По содержанию работы имеется ряд вопросов и замечаний:

1. На рис. 29, с. 98 диссертации приведена характеристика эжектора ЭО-50, установленного на экспериментальном конденсаторе. Предельная производительность эжектора, определяющая длину его рабочего участка, составляет $G_{в}^* \approx 0,009$ кг/с (32 кг*/ч), что соответствует эжектору ЭО-30. Почему на этом же рисунке характеристика эжектора при давлении рабочего пара $P_p=0,6$ МПа проходит выше характеристики с $P_p=0,7$ МПа?

2. При исследовании опытного конденсатора расходы воды по секциям распределялись пропорционально давлению воды за секциями (формула 4.7, с. 102). Почему распределение расходов по секциям не проводилось пропорционально корню квадратному из перепада давлений в соответствии с общепринятыми представлениями? Учитывался ли при оценке распределения расходов воды по секциям коллекторный эффект?

3. На с. 99 диссертации указывается, что подсос воздуха через неплотности экспериментального стенда составляет $G_{в}=15 \cdot 10^{-7}$ г/с, а на с. 101 – $G_{в}=28 \cdot 10^{-6}$ кг/с, т.е. примерно в 20000 больше.

4. Оценка потерь давления по стороне ПГС в опытном конденсаторе выполнена на наш взгляд очень приближенно – «линейно зависящими от количества рядов труб в» секциях. Если принять, что скорости ПГС в секциях постоянны, то необходимо учесть изменение плотности ПГС и зависимость коэффициента сопротивления от числа Re.

9. Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты работы по исследованию интенсификации тепломассообмена при конденсации пара с высоким содержанием, до 20%, неконденсирующихся газов на пучках гладких горизонтальных труб полезны для разработки и проектирования конденсаторов турбин ТЭС и АЭС.

10. Заключение

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления и ценности работы.

Диссертация Крылова Виктора Сергеевича «Экспериментальное исследование процессов теплообмена при конденсации водяного пара из смеси с высоким содержанием неконденсирующихся газов и разработка на этой основе высокоэффективного конденсатора» представляет собой законченную научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой на основании выполненных автором исследований, изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в понимание процессов конденсации водяного пара из смеси с высоким содержанием неконденсирующихся газов и разработку высокоэффективных конденсаторов паровых турбин.

Диссертация представляет собой самостоятельно выполненное научное исследование. Новые научные результаты, полученные лично соискателем, имеют существенное значение для науки и практики. Все научные положения, разработанная методика, математические модели и выводы, приведенные в диссертационной работе, обоснованы и соответствуют общефизическим представлениям. Поставленные задачи решены, и цель диссертационного исследования достигнута.

Автореферат выполнен с соблюдением установленных требований, достаточно полно и точно отражает содержание диссертации.

Публикации автора полностью соответствуют теме диссертационной работе, отражают ее основное содержание.

Представленная диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, а ее автор, Крылов Виктор Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.7 – Турбомашины и поршневые двигатели (технические науки).

Отзыв ведущей организации на диссертацию и автореферат рассмотрен, обсужден и одобрен на основании заключения кафедры «Турбины и двигатели» УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина и утвержден на заседании кафедры 22.05.2025, протокол № 5.

Заведующий кафедрой
«Турбины и двигатели»
ФГАОУВО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н.
Ельцина»,
к.т.н., доцент

Комаров Олег
Вячеславович

Профессор кафедры
«Турбины и двигатели»
ФГАОУВО «УрФУ имени
первого Президента России Б.Н.
Ельцина»,
д.т.н., профессор

Аронсон Константин
Эрленович

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого

Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина»
620002, Российская Федерация, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул.
Мира, д. 19.

Телефон: +7 (343) 375-45-07

e-mail: rector@urfu.ru