

На правах рукописи



КАРТУЕСОВА Анна Юрьевна

**РАСЧЕТНО – ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СЕКЦИЙ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАТОРА
ПАРОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО
ТЕПЛОСЪЕМА**

2.4.7 – Турбомашины и поршневые двигатели
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Калуга – 2024

Работа выполнена в Закрытом акционерном обществе
«Научно–производственное внедренческое предприятие «Турбокон»
(ЗАО НПВП «Турбокон»), г. Калуга

Научный руководитель: Мильман Олег Ошерович, доктор технических наук, профессор, Президент Закрытого акционерного общества «Научно–производственное внедренческое предприятие «Турбокон», г. Калуга.

Официальные оппоненты:

Крюков Алексей Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры низких температур Института тепловой и атомной энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

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.

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

Защита диссертации состоится **26 сентября 2024 г. в 14.00** на заседании Совета 75.1.001.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе Открытого акционерного общества «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» по адресу: 115280, г. Москва, ул. Ленинская Слобода, д. 23, стр. 4. Зал заседаний Научно-технического совета.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Научно–технической библиотеке Открытого акционерного общества «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» и на официальном сайте организации: <https://vti.ru>.

Автореферат разослан «24» июля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Д.В. Тарадай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования определяется магистральными направлениями развития энергетической отрасли народного хозяйства Российской Федерации в контексте национальных целей развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года, определенных Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309, целями и задачами Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р.

В этом аспекте особую актуальность приобретает решение комплекса научно-технических проблем, связанных с повышением эффективности отечественной теплоэнергетики и, в частности, действующих тепловых электрических станций.

Как свидетельствует проведенный нами теоретический анализ специальной литературы и исследований, совершенствование работы конденсационных устройств паротурбинных установок (ПТУ) является одним из важных резервов повышения эффективности на ТЭС.

Проектирование вакуумных конденсаторов паротурбинных установок осуществляется на расчетных условиях, когда все части конденсатора охлаждаются одинаково, расходы охлаждающей воды (воздуха – для воздушных конденсаторов) и присосы воздуха также одинаковы. Отклонение от расчетного режима работы может возникать по ряду причин, например, неравномерного охлаждения теплообменной поверхности конденсатора вследствие ее загрязнения, либо изменения характеристики вентилятора (в случае воздушных конденсаторов), наличия локальных присосов воздуха и пр.

Поиск путей решения этих проблем основывается на различных способах: углубления вакуума при очистке теплообменных поверхностей конденсаторов от отложений; совершенствования системы отсоса паровоздушной смеси; повышение эффективности работы эжекторов.

Теоретический анализ показал, что проблема работы конденсаторов на режимах неравномерного теплосъема недостаточно изучена, проведение специальных мероприятий по повышению эффективности работы достаточно трудоемко и требует значительных затрат. Особенно это существенно для воздушно – конденсационных установок с большим числом вентиляторов.

Все вышеизложенное подтверждает актуальность выбранной темы исследования.

Степень научной разработанности темы диссертации.

Поиску вариантов и способов совершенствования работы конденсационных установок посвящено много работ российских и зарубежных ученых: Л.Д. Бермана, О. О. Мильмана, В.А. Федорова, Г.Г. Шкловера, Ю.М. Бродова, К.Э. Аронсона, И.И. Гогонина, В.И. Гомелаури, Г.И. Канюка, В. А. Меркулова, И.Б. Мурманского, М. Jovic, М. Lakovic, J. Bogdanovic–Jovanovic, M. Walker и других.

В настоящем исследовании изучены особенности работы вакуумного конденсатора пара в условиях неравномерного теплосъема и предложен новый способ повышения его эффективности, основанный на внедрении системы дросселей в линию удаления ПВС перед газоудаляющим устройством в русле научной школы Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, доктора технических наук, профессора О.О. Мильмана.

Объект исследования – вакуумный конденсатор пара с газоудаляющим устройством.

Предмет исследования - особенности работы вакуумных конденсаторов паротурбинных установок в условиях неравномерного теплосъема.

Цель диссертационного исследования – проведение расчетно – экспериментального исследования совместной работы конденсатора и газоудаляющего устройства в условиях неравномерного теплосъема и обоснование технических решений по повышению эффективности работы конденсационной установки.

Для достижения указанной цели в настоящей работе поставлены и решены следующие **задачи**

1) проанализировано влияние различных видов неравномерности на эффективность конденсаторов паротурбинных установок;

2) проведено расчетно-экспериментальное исследование эффективности применения дроссельных вставок в системе газоудаления паровоздушной смеси вакуумных конденсаторов с объемными газоудаляющими устройствами при неравномерном охлаждении теплообменной поверхности и наличия присосов воздуха в различных зонах;

3) экспериментально определена величина оптимального диаметра дросселей для исследуемой системы;

4) проанализированы полученные экспериментальные данные;

5) разработано и обосновано техническое решение по повышению эффективности работы системы удаления паровоздушной смеси из конденсатора на основе внедрения дроссельных вставок при совместной работе вакуумных конденсаторов и пароструйных эжекторов;

6) разработаны рекомендации по расчету оптимального диаметра дросселей для многосекционных систем вакуумных конденсаторов, в том числе и воздушно – конденсационных установок с большим числом вентиляторов.

Методология и методы исследования. В организации и проведении диссертационного исследования реализована методология системного подхода к исследованию сложных технических систем, позволяющая, в частности, в соответствии с объектом, предметом, целью и задачами исследования получить объективное знание о внутренних взаимосвязях параметров, процессов и характеристик совместной работы конденсатора и газоудаляющего устройства в условиях неравномерного теплосъема, о внешних связях данной технической системы, а также обосновать технические решения, необходимые и достаточные для повышения эффективности работы конденсационной установки.

В процессе исследования использовались методы системного анализа, используемые при изучении и моделировании теплоэнергетических установок и систем.

Научная новизна. В результате выполнения диссертационного исследования получены следующие новые научные результаты:

- выполнен анализ работы секционных конденсаторов паротурбинных установок при условиях неравномерного теплосъема;
- проведено экспериментальное исследование режимов работы макета вакуумного конденсатора пара при неравномерном охлаждении части теплообменной поверхности и наличия присосов воздуха в пар;
- разработана технология повышения экономичности и надежности совместной работы вакуумных конденсаторов и пароструйных эжекторов, основанная на установке в линию эжектирования паровоздушной смеси дроссельных вставок;
- экспериментально установлено наличие оптимального размера дроссельной вставки для заданных условий работы конденсатора;
- разработана методика расчета оптимального диаметра дросселя для многосекционных конденсаторов.

Теоретическая значимость результатов выполненного диссертационного исследования заключается в том, что результаты, полученные при её выполнении, вносят значительный вклад в понимание и теоретическое обоснование процессов работы конденсаторов паротурбинных установок в условиях неравномерного теплосъема и способа борьбы со снижением тепловой эффективности, возникающей вследствие неравномерного охлаждения и локальных присосов воздуха. Они могут быть использованы для:

- оценки влияния факторов неравномерности на показатели работы конденсационной установки;
- повышения эффективности работы конденсаторов при отклонении от расчетных условий.

Практическая значимость результатов исследования состоит в том, что в диссертации разработаны новые технические решения, обеспечивающие повышение эффективности работы вакуумного конденсатора пара за счет внедрения дроссельных вставок в линию эжектирования ПВС. Предложенная методика позволяет рассчитать оптимальный диаметр дросселей для любых систем секционных вакуумных конденсаторов, в том числе и воздушно – конденсационных установок с большим числом секций.

Личный вклад соискателя. Автор лично участвовал в постановке задач и планировании, организации и осуществлении эксперимента, был задействован на всех этапах создания экспериментального стенда, самостоятельно проводил эксперименты, осуществлял измерения и обработку результатов измерений, а также выполнял анализ полученных данных. Принимал участие в разработке методики расчета оптимального диаметра дросселя для многосекционных конденсаторов.

Положения, выносимые на защиту:

- расчетно – экспериментальное обоснование повышения эффективности работы конденсатора паротурбинной установки при введении дроссельных вставок в линии газоудаления;
- результаты экспериментального исследования конденсации пара внутри параллельно работающих каналов макета конденсатора при неравномерном охлаждении;
- методика расчёта оптимального размера дросселей для многосекционных систем вакуумных конденсаторов.

Достоверность результатов исследований обеспечена системным характером организации исследования, корректной постановкой цели и задач работы, личным участием соискателя в планировании эксперимента на всех его этапах и в обработке и интерпретации экспериментальных данных, использованием измерительных приборов, имеющих необходимый уровень точности в диапазоне измеряемых величин.

Апробация работы. 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 НПВП "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 опубликовано около 20 работ, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК по научной специальности 2.4.7 – Турбомашин и поршневые двигатели. 6 статей опубликованы в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science. Получен 1 патент РФ на полезную модель.

Диссертация является научно – квалификационной работой, **соответствует паспорту специальности 2.4.7 – Турбомашины и поршневые двигатели: пункт 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. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка (82 наименования). Общий объем диссертации составляет 151 страницу, включая 47 рисунков, 15 таблиц и 13 страниц приложения.

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 представлен обзор особенностей работы конденсационных установок и газоудаляющих устройств. Рассмотрены методы расчета основных теплофизических и гидравлических параметров конденсационной установки, приведены основные методики расчета коэффициента теплопередачи. Описаны причины возникновения неравномерного теплосъема в вакуумных конденсаторах пара паротурбинных установок и способы борьбы с ним.

Эффективность работы конденсатора определяется средней плотностью теплового потока при данном давлении в трубном пучке; она зависит, в том числе, от условий взаимодействия конденсатора с устройством удаления неконденсирующихся газов, а также степени взаимного влияния их на конечное давление.. Лучшими считаются те конденсационные устройства, у которых эта величина имеет наибольшее значение при том же давлении конденсации.

В данной главе рассмотрены расчетные уравнения для основных теплофизических и гидравлических параметров конденсатора паротурбинной установки: коэффициента теплопередачи, коэффициентов теплоотдачи, температурного напора, площади теплообменной поверхности, термодинамической эффективности, потерь давления.

Рассмотрено влияние различных параметров на эффективность работы конденсационной установки. В условиях эксплуатации паротурбинной установки при изменении давления в конденсаторе будут изменяться как технико-экономические показатели турбины, так и надежность работы ее отдельных элементов. Увеличение недогрева охлаждающей воды на выходе из конденсатора обычно свидетельствует об уменьшении коэффициента теплопередачи в конденсаторе, вызванном, как правило, нарушением в работе газоудаляющего устройства, увеличением присосов воздуха в вакуумную часть турбины, а также загрязнением поверхности охлаждения или совместным действием этих факторов.

Основным подходом к определению площади теплообменной поверхности конденсатора в отечественной и зарубежной нормативной литературе является расчет коэффициента теплопередачи и определение на этой основе остальных параметров. Выполнен сравнительный анализ и приведены формулы Л.Д. Бермана (методика ВТИ), УПИ, КТЗ, формулы Института теплообмена США и ВЕАМА; формула фирмы «Метро – Вилкерс» и т.д.

В главе выполнен сравнительный анализ работы устройств – вакуумных насосов, применяемых для удаления неконденсирующихся газов из конденсаторов. С этой целью применяются насосы струйного типа, в которых рабочей (эжектирующей) средой служит пар (пароструйные эжекторы) или вода (водоструйные эжекторы), и водокольцевые насосы.

К преимуществам пароструйных эжекторов по сравнению с водокольцевыми насосами можно отнести отсутствие вращающихся элементов и отсутствие потерь теплоты с охлаждающим теплоносителем, поскольку весь конденсат из охладителей возвращается в цикл, а не теряется с циркуляционной водой, как это происходит при использовании водокольцевых насосов и водоструйных эжекторов. Кроме того, пароструйные эжекторы существенно дешевле водокольцевых насосов. Водоструйные эжекторы требуют около 5-7% расхода циркуляционной воды в отличие от пароструйных, однако при отсасывании сухого воздуха его характеристика почти линейна.

Между работой конденсатора и воздухоудаляющего устройства существует тесная взаимосвязь, проявляющаяся при всех режимах работы конденсационной установки. Любое изменение режима работы конденсатора, которое вызывает изменение температуры отсасываемой из него паровоздушной смеси приводит к изменению давления на стороне всасывания воздухоудаляющего устройства и, как следствие, давления в конденсаторе.

Одним из последствий неравномерного охлаждения является дополнительный объем неконденсированного пара ΔV на выходе из конденсатора, который затем поступает в эжектор. Это приводит к увеличению давления на всасе эжектора P_s , и, как следствие, к смещению характеристики конденсатора в зону более высоких давлений с увеличением давления в конденсаторе P_k на величину ΔP_k .

Этот процесс иллюстрируется на рис.1. Неравномерный теплосъем оказывает влияние на характеристики конденсационной установки. Они изменяются относительно работы конденсатора при расчетных условиях.

На основе проведенного анализа сформированы основные задачи диссертационного исследования: анализ работы многосекционных конденсаторов пара с учетом неравномерного распределения интенсивности теплообмена по секциям.

Во второй главе проанализированы основные источники и причины возникновения неравномерного теплосъема в конденсаторах. Отклонение от расчетного режима работы возникает по ряду причин, одна из которых загрязнения теплообменной поверхности (рис.2), разрушения части

теплообменной поверхности или наличие локальных присосов воздуха, нарушение в распределении расхода охлаждающей среды.

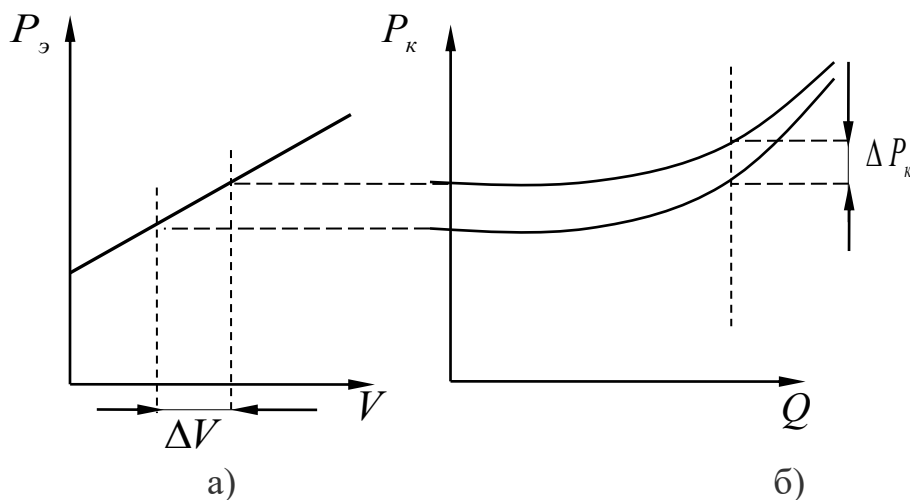


Рис. 1. Взаимодействие воздухоудаляющего устройства с конденсатором при уменьшении расхода охлаждающей воды на одной из его частей: а) – характеристика эжектора (зависимость давления на входе в эжектор $P_э$ от объемного расхода воздуха V); б) – характеристика конденсатора (зависимость давления в конденсаторе $P_к$ от теплосъема Q)

Для многосекционных воздушных конденсаторов с большим числом секций причиной неравномерного теплосъема может являться неисправность вентиляторов секций – изменение их оборотов или частичное отклонение от рабочего режима.



Рис. 2. Загрязнение теплообменных труб со стороны входа воздуха

Важный источник неравномерности – ветер, который заметно влияет на работу секций воздушно–конденсационной установки (ВКУ).

Приведен алгоритм и результаты расчета по распределению потоков пара в режимах полного и ухудшенного охлаждения секции воздушного конденсатора, состоящей из нескольких теплообменных модулей. Они показывают, что если на выходе из каждого теплообменного модуля устанавливается дроссель небольшого сопротивления, то благодаря гидравлическим потерям в нем расход несконденсированного пара в паровоздушный эжектор уменьшится.

В данной главе описана разработанная методика расчета оптимального диаметра дросселя для многосекционных конденсаторов.

Заданы следующие условия для определения характеристик многосекционного конденсатора пара: при равномерном охлаждении всех секций используются параметры с индексом 0; если охлаждение ВКУ неравномерно, то секции, имеющие равномерное охлаждение, – параметры с индексом 1, а секции с отклонением от равномерного охлаждения – параметры с индексом 2. На рис. 3 показана схема ВКУ из n числа секций.

В процессе анализа течения пара в секциях конденсатора паротурбинной установки введены четыре комплекса:

1. Комплекс C_x , учитывающий изменение квадрата скорости пара по мере конденсации

$$C_x = \frac{(1-x)^2}{3} + x(1-x) + x^2, \quad (1)$$

где x – паросодержание на выходе.

2. Параметр K , включающий в себя характеристики теплообменных труб

$$K = \lambda \frac{l}{d_{\text{тр}}}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; l – длина трубы, м; $d_{\text{тр}}$ – внутренний диаметр теплообменных труб, м.

3. Комплекс L , учитывающий соотношение потерь в трубах конденсатора и дросселях

$$L = \xi_{\text{др}} n_{\text{тр1}}^2 \left(\frac{d_{\text{тр}}}{d_{\text{др}}} \right)^4, \quad (3)$$

где $\xi_{\text{др}}$ – коэффициент местного сопротивления дросселя; $n_{\text{тр1}}$ – число теплообменных труб для одного хода по пару; $d_{\text{др}}$ – внутренний диаметр отверстия дросселя, м.

4. Комплекс M , учитывающий отношения скоростей пара секций с неравномерным охлаждением W_2 к секциям с равномерным охлаждением W_1 :

$$M = \frac{w_2}{w_1} = \sqrt{\frac{C_{x1} + \frac{L}{K}x_1^2}{C_{x2} + \frac{L}{K}x_2^2}}. \quad (4)$$

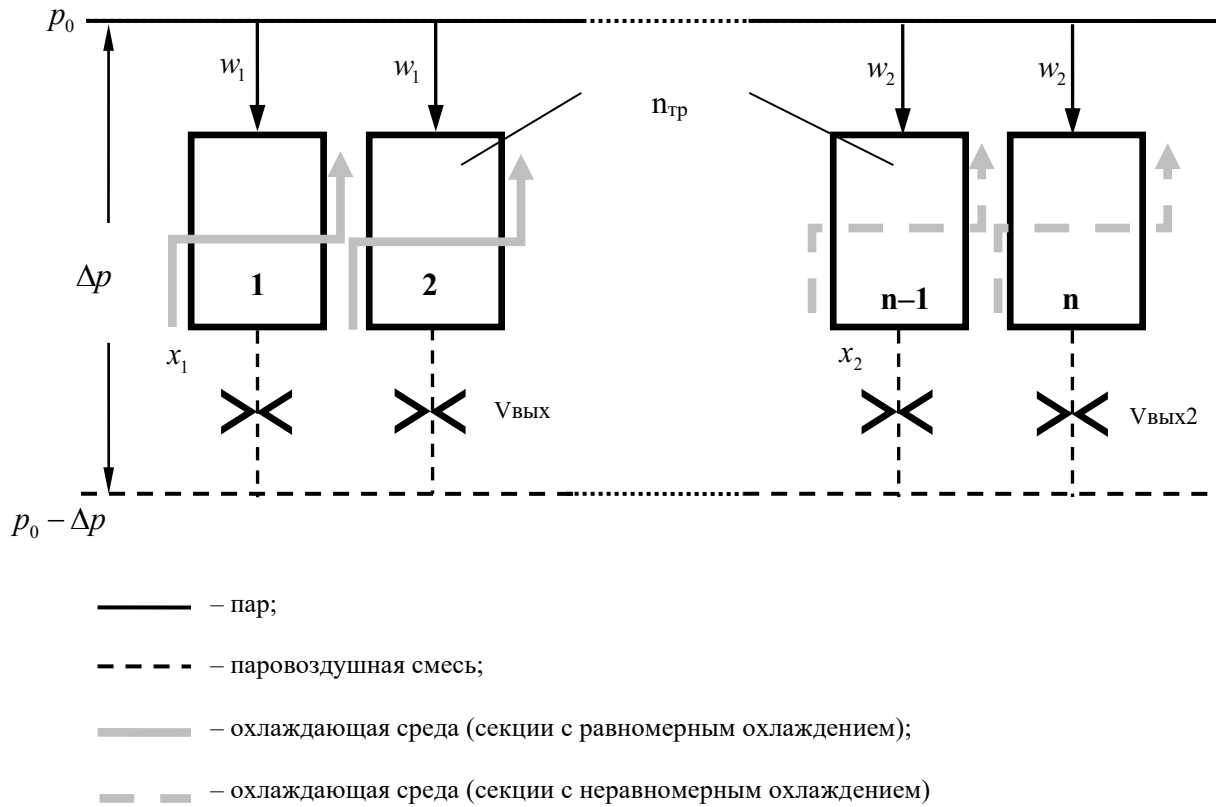


Рис. 3. Схема ВКУ из N числа секций

С учетом введенных комплексов формулы для определения потерь давления при конденсации в трубном пучке по модели вязкого трения $\Delta P_{\text{тр}}$, потерь давления в дросселях $\Delta P_{\text{др}}$ после теплообменного модуля и суммарных потерь для секций с равномерным и неравномерным охлаждением $\Delta P_{\Sigma 1}$ будут иметь вид:

$$\Delta P_{\text{тр}} = K w_0^2 C_x \left[\left(\frac{1}{\frac{n_1}{n_0} + \frac{n_2}{n_0} M} \right)^2 - 1 \right], \quad (5)$$

где w_0 – скорость пара при равномерном охлаждении всех секций конденсатора;
 n_0 – общее число секций, n_1 – число секций с равномерным охлаждением; n_2 – число секций с неравномерным охлаждением;

$$\Delta P_{др} = L \frac{w_0^2 x_1^2}{\left(\frac{n_1}{n_0} + \frac{n_2}{n_0} M \right)^2}, \quad (6)$$

Изменение давления эжектора ΔP_V в условиях, когда часть секций имеют неравномерный теплоъем:

$$\Delta P_V = \frac{\Delta V}{V_0} (P_{эп} - P_{э0}), \quad (7)$$

где $P_{эп}$ – давление в рабочей точке эжектора, Па; $P_{э0}$ – давление в нулевой точке эжектора, Па; $\frac{\Delta V}{V_0}$ – изменение объемного расхода при неравномерном теплоъеме.

В диссертации приведены расчетные комплексы и формулы для многоходовых теплообменных модулей конденсаторов пара ПТУ.

В третьей главе приведено описание экспериментального стенда макета вакуумного конденсатора пара, созданного на базе МНИЛ им. В.А. Федорова, методик проведения экспериментальных исследований, обработки данных и оценка погрешности.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4. Пар от электрического парогенератора «Гейзер – 200К» подается одновременно через общий коллектор в 2 канала ОК1 и ОК2. Каналы расположены параллельно друг другу и имитируют работу секций конденсатора. Каждый канал имеет конструкцию «труба в трубе»: во внутренней трубе сверху вниз движется водяной пар, в кольцевом зазоре течет противотоком охлаждающая вода.

Внутренняя теплообменная труба из стали 12Х18Н10Т с наружным диаметром 25 мм и толщиной стенки 2 мм, наружная – с внутренним диаметром 28 мм и толщиной стенки 2 мм. Длина труб 2000 мм, а угол установки – 45° к горизонту.

В общий коллектор подачи пара на каналы установлено критическое сопло для измерения расхода пара на макет конденсатора G_n и датчики измерения температуры и давления пара перед соплом P_1 и t_1 , он. В паровую линию перед каналами входит линия подачи воздуха с установленным в ней ротаметром для измерения расхода $G_{вз}$ и приборы измерения его давления и температуры $P_{вз}$ и $t_{вз}$.

Расход воздуха регулировался вентилем К41. В паровом коллекторе перед каналами конденсатора измеряется температура и давление пара P_2 и t_2 .

На выходе из каналов установлены конденсатосборники с прозрачными трубками из оргстекла с отметками протарированных объемов h и h' . При закрытии линий слива в бак сбора конденсата Б из К51 и К51' стеклянная трубка и конденсатосборник заполнялись конденсатом, измерялась температура конденсата $t_{ко}$ и $t_{ко}'$. При этом измерялся расход конденсата методом регистрации времени заполнения им заранее протарированных объемов. Разрежение в каналах макета конденсатора создавалось за счёт конденсации пара и поддерживалось с

помощью водоструйного эжектора ЭГ, отсасывающего паровоздушную смесь (ПВС).

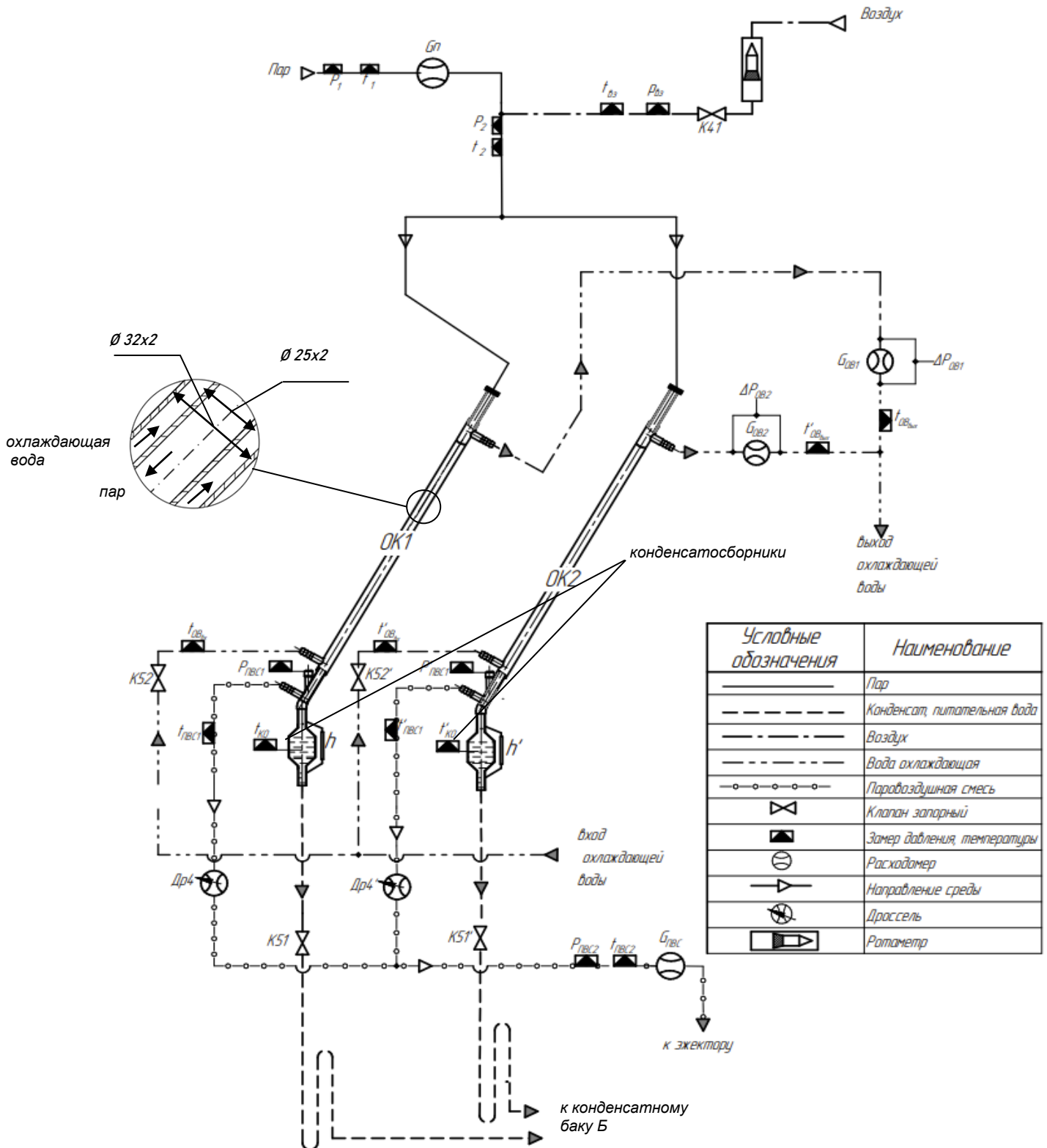


Рис. 4. Схема стенда макета вакуумного конденсатора

ПВС поступает в линию эжектирования, в которой предусмотрена возможность установки дросселей $Др4$ и $Др4'$ за каждым каналом, либо в

байпасную линию без дросселей. Параметры ПВС измерялись на выходе из каналов конденсатора ОК1 и ОК2 ($t_{ПВС1}$, $t'_{ПВС1}$ и $P_{ПВС1}$, $P'_{ПВС1}$) и перед эжектором ($P_{ПВС2}$, $t_{ПВС2}$). Расход охлаждающей воды на каждый канал $G_{ОВ1}$ и $G_{ОВ2}$ определяется с помощью диафрагм, перепад давлений на которых $\Delta P_{ОВ1}$ и $\Delta P_{ОВ2}$ измеряется дифманометрами, температура воды на входе ($t_{ОВвх}$, $t'_{ОВвх}$) и выходе из каналов конденсатора ($t_{ОВвых}$, $t'_{ОВвых}$). За измерительными участками установлены вентили К52 и К52', с помощью которых регулируется расход воды на охлаждение каждого канала.

В линиях слива конденсата каждого канала был сделан гидрозатвор, который предотвращал попадание ПВС в конденсатный бак Б.

Для некоторых режимов в общий коллектор пара перед макетом конденсатора подавался дополнительный воздух через ротаметр. С помощью этого моделировались присосы воздуха в конденсатор. Массовые расходы подаваемого воздуха составляли от 0 до 1,6% от расхода пара на макет конденсатора. Для исключения влияния дополнительных присосов воздуха на исследуемые процессы были проведены испытания по определению величины присосов на стенд, составившей около 6 г/ч. Данная величина учтена при обработке экспериментальных данных.

Перед эжектором было установлено критическое сопло, с помощью которого измерялся расход ПВС $G_{пвс}$, удаляемой из каналов макета конденсатора. В том числе, установка сопла позволяла создать постоянный объемный расход в эжектор, что является свойством объемных газоудаляющих аппаратов: пароструйных эжекторов и водокольцевых насосов.

Таким образом, при установленном сопле на линии эжектирования паровоздушной смеси эжектор работает как объемный аппарат, при снятом – как водоструйный.

Массовый расход пара G_n составил около 14,4 кг/ч, давление в конденсаторе 8 – 20 кПа. Диаметры отверстий устанавливаемых дросселей – 2,7; 3,5; 4,9 мм.

Основным параметром, с помощью которого оценивались эффективность экспериментальных данных, является располагаемая разность температур конденсатора:

$$\Delta = t_s - t_{ОВВХ} , \quad (8)$$

где t_s — температура насыщения в конденсаторе $t_s = f(p_k)$, °С; $t_{ОВВХ}$ — температура охлаждающей воды на входе в конденсатор, °С.

Относительный расход охлаждающей воды на первый канал конденсатора

$$\bar{G}_{ОВ} = \frac{G_{ОВ1}}{G_{ОВ2}} \cdot 100\% , \quad (9)$$

где $G_{ОВ1}$ — массовый расход на охлаждение первого канала, кг/с; $G_{ОВ2}$ — массовый расход на охлаждение второго канала, кг/с.

Расход воздуха $G_{\text{вз}}$ измерялся ротаметром. Доля воздуха в паре рассчитывалась как $\bar{G}_{\text{вз}}$

$$\bar{G}_{\text{вз}} = \frac{G_{\text{вз}}}{G_n} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где G_n – массовый расход пара на конденсатор, кг/с.

Расход охлаждающей воды на каждом канале определялся по калибровочным кривым.

Сделана оценка погрешности эксперимента для термопар после калибровки вместе с каналом, которая составляет $\pm 0,0075t$, где t – измеряемая величина температуры. Для использованных в экспериментах датчиков давления типа АИР погрешность составляет $\pm 0,36\%$ от предела измерений.

Погрешность прямых измерений параметров: расход пара (критическое сопло) – 1,2%; расход паровоздушной смеси (критическое сопло) – 1,2 %; расход охлаждающей воды (стандартные диафрагмы) – 1,5 %; расход воздуха через ротаметр – 1,5 %; давление пара – 0,2 %; перепад давлений на диафрагмах охлаждающей воды – 0,25 %; температура пара, конденсата, воздуха – 0,5°C.

Выполнена оценка среднеквадратичного отклонения σ и случайной погрешности среднего \bar{s} . Например, для рабочих значений давления и температуры пара: $P1 = 32$ кПа – $\sigma = 0,08$ кПа (0,2%), а $\bar{s} = 0,015$ кПа, для $t1 = 83$ °C – $\sigma = 0,03$ °C (0,03%), а $\bar{s} = 0,005$ °C. Определена косвенная погрешность измерений для расходов текучих сред и плотности.

Рассчитанные величины погрешностей позволяют корректно определить влияние исследуемых дросселей на характеристики макета конденсатора.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния неравномерности охлаждения, расходов воздуха и размеров дросселей на параметры работы макета конденсатора пара. Были проведены испытания для условий, показанных в таблице 1.

В режимах № 1,2,7,8 табл. 1 проводилось изучение влияния неравномерного охлаждения на параметры конденсации при различных диаметрах дросселей. Массовый расход охлаждающей воды на первый канал относительно второго уменьшался на 10– 90%. В режимах № 3,4 – влияние неравномерности охлаждения на параметры конденсации при одинаковой величине присосов воздуха в конденсатор: расход воды на первый канал также уменьшался на 10– 90%, в пар подавался воздух – массовая доля около 1%.

В режимах № 9,10 – влияние неравномерности охлаждения на параметры конденсации при одинаковой величине присосов воздуха при совместной работе конденсатора и водоструйного эжектора. В режимах № 5, 6 – влияние присосов воздуха на работу конденсатора при наличии и отсутствии дросселей: расход воды на первый канал около 25% относительно расхода на охлаждения второго, а расход воздуха в пар изменялся (по массовой доле) от 0 до 1,6%.

Таблица 1. Перечень режимов испытаний

№	Относительный расход охлаждающей воды, $\bar{G}_{об}$, %	Доля воздуха в паре, $\bar{G}_{вз}$, %	Дроссели в линии эжектирования ПВС; $d_{др}$, мм
1	от 10 до 100	—	—
2		—	3,5
3		1	—
4		1	3,5
5	25	от 0 до 1,6	—
6		от 0 до 1,6	3,5
7	от 10 до 100	—	2,7
8		—	4,9
9*		1	—
10*		1	3,5

Во всех случаях результаты эксперимента представлены в виде графиков зависимости располагаемой разности температур конденсатора $\Delta = t_s - t_{об\text{вх}}$ от исследуемого параметра. На рис.5 дана зависимость Δ от относительного расхода охлаждающей воды на первый канал $\bar{G}_{об}$.

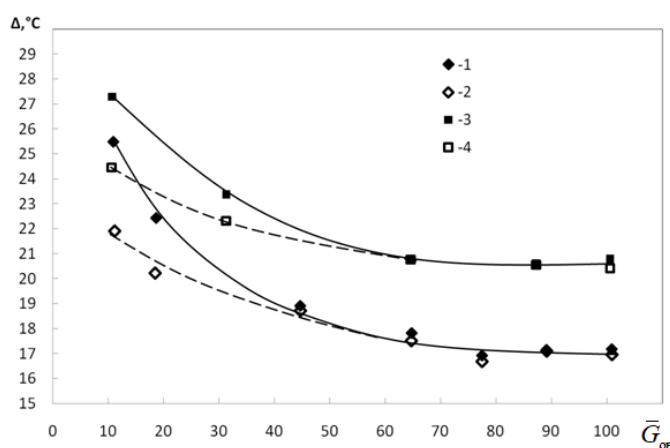


Рис. 5. Зависимость располагаемой разности температур конденсатора Δ от относительного расхода охлаждающей воды на первый канал $\bar{G}_{об}$ с дросселями диаметром 3,5 мм: 1 – режим №1 без дросселей; 2 – режим №2 с дросселями; 3 – режим №3 без дросселей, с $\bar{G}_{вз} = 1\%$; 4 – режим №4 с дросселями, с $\bar{G}_{вз} = 1\%$

С увеличением неравномерности охлаждения конденсатора, рис.6, располагаемая разность температур растет, работа конденсатора ухудшается. В диапазоне расходов на охлаждение первого канала от 100% до 50% рост слабо

выражен; при дальнейшем уменьшении расхода воды Δ начинает возрастать. Влияние дросселей диаметром 3,5мм обнаруживается при уменьшении расхода охлаждающей воды от 50% до 10%. При установке дросселей и уменьшении расхода воды на первый канал располагаемый перепад температур в конденсаторе увеличивается не так сильно, как в вариантах без дросселей и при $\bar{G}_{об} = 11\%$ разница составляет 3,5°C для режимов №1 и 2 и 2,8°C для режимов №3 и 4.

На рис.6 показан график зависимости располагаемой разности температур конденсатора Δ от доли воздуха в паре для режимов № 5,6. На режимах с 25% охлаждением части теплообменной поверхности конденсатора при увеличении расхода воздуха Δ линейно возрастает. С установкой дросселей диаметром 3,5 мм располагаемая разность температур уменьшается примерно на 1°C на всем исследованном диапазоне расходов воздуха, давление в конденсаторе снижается.

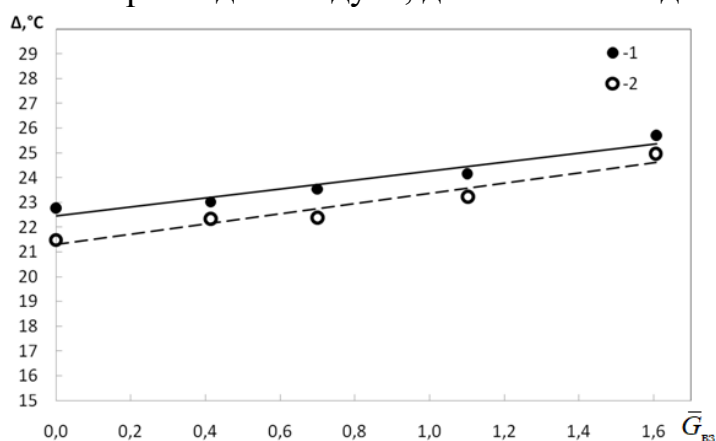


Рис. 6. Зависимость располагаемой разности температур Δ конденсатора от доли воздуха в паре $\bar{G}_{вз}$ при $\bar{G}_{об} = 25\%$ с дросселями диаметром 3,5 мм: 1 – режим № 5 – без дросселей; 2 – режим № 6 – с дросселями

С целью исследования влияния дросселей на работу эжектора сопло, установленное на линии эжектирования, было снято при проведении экспериментов № 9,10. Установленное критическое сопло создавало характеристику объемного расхода, близкую к пароструйным эжекторам.

Водоструйный эжектор не имеет такой зависимости от меняющихся параметров эжектируемой парогазовой смеси при изменении расхода воздуха в ней.

Установка дросселей диаметром 3,5 мм дает значение Δ больше в среднем на 2°C по сравнению с режимами без них, т.е их использование в случаях, когда конденсатор работает совместно с водоструйным эжектором не эффективно (см. рис.7). Таким образом, установка дросселей создала дополнительное сопротивление и ухудшила работу макета конденсатора.

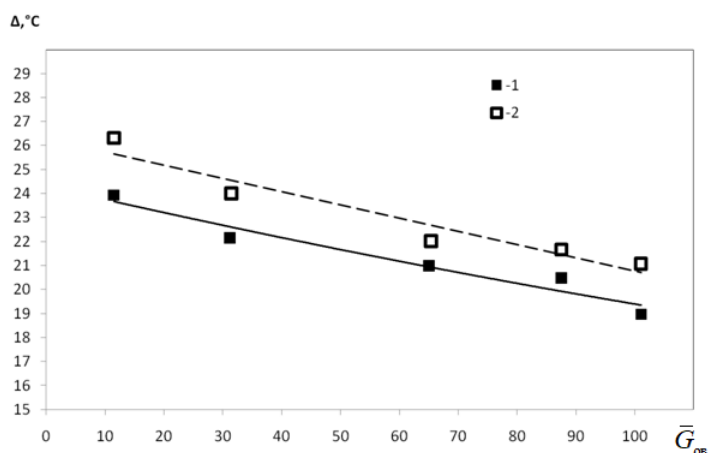


Рис. 7. Зависимость располагаемой разности температур Δ конденсатора от относительного расхода охлаждающей воды на первый канал $\bar{G}_{об}$ с дросселями диаметром 3,5 мм: 1 – режим № 9 – без дросселей; 2 – режим № 10 – с дросселями.

Были проведены испытания по определению оптимального размера дросселя для данной экспериментальной модели конденсатора. Существует некий оптимум перепада давлений на дросселе, который не приводит к заметному изменению характеристики воздухоудалющего устройства, но не дает «запаривания» эжектора. Исследуемые дроссели цилиндрического сечения имели диаметры 2,7 мм; 3,5 мм и 4,9 мм. Как следует из результатов, показанных на рис.8, оптимум лежит между диаметрами 3 и 4 мм.

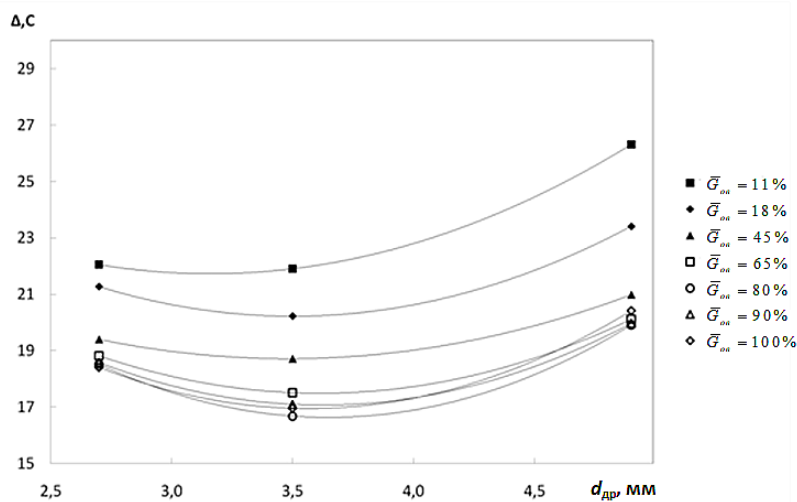


Рис. 8. Зависимость располагаемой разности температур Δ конденсатора от диаметра дросселей

В пятой главе представлены результаты выполненного расчета многосекционного конденсатора пара с трехходовыми теплообменными модулями в условиях неравномерного теплосъема на основании методики, изложенной во второй главе. Приведен расчет выбора такого диаметра дросселя, чтобы в итоге получить более низкое давление конденсации при заданной неравномерности теплосъема в одном из модулей.

Вычисления выполнены для некоторого диапазона значений дросселей с диаметрами отверстий $0,025 \div 0,2$ м для определения минимального расхода в

эжектор и минимального давления на входе в эжектор $P_э$. Оптимальный диаметр дросселя, полученный в расчете, составил 0,1 м (см. таблица 2).

Таблица 2. Расчетные данные для определения оптимального диаметра дросселей и построения графиков

$d_{др}, м$	0,02	0,16	0,14	0,12	0,1	0,8	0,6
$P_э, кПа$	5,23	5,21	5,20	5,19	5,19	5,21	5,31

Результаты расчета показали снижение расхода пара в эжектор на 35% относительно расчета режима без дросселя. Как следствие, давление в эжекторе и конденсаторе снижается. На рис. 9 показано, что давление на входе в эжектор смещается в зону более низких значений при установке дросселя.

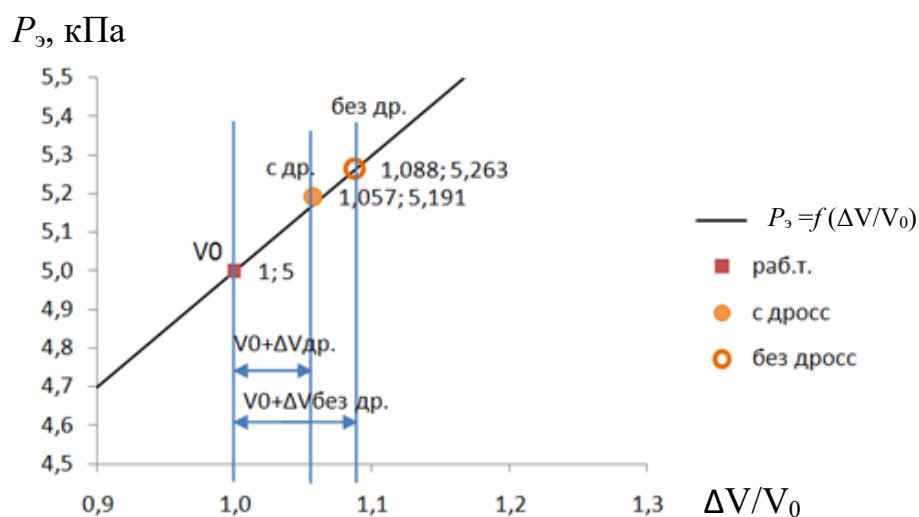


Рис. 9. График зависимости $P_э = f(\Delta V/V_0)$ с расчетными точками с оптимальным диаметром дросселя и без дросселя

Приведенные в данной главе результаты расчета секции ВКУ при неравномерном теплосъеме показывают, что установка дросселей в линию удаления ПВС каждой секции снижает расход несконденсированного пара в газоудаляющее устройство и, следовательно, углубляет вакуум в конденсаторе паротурбинной установки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Выполнен анализ технической и патентной литературы в области эффективности работы вакуумных конденсаторов пара. Подтверждена актуальность исследований влияния неравномерности отвода тепла от различных частей конденсатора на его общие показатели, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

2. Рассмотрены основные причины и источники возникновения неравномерного теплосъема при работе конденсационных устройств с воздушным или водяным охлаждением.

3. Описаны основные характеристики многосекционного конденсатора пара для условий работы при неравномерном теплосъеме, а также их изменение при установке дросселей в линии удаления ПВС.

4. Разработана методика определения дополнительного объема паровоздушной смеси при неравномерном теплосъеме секций конденсатора пара ПТУ; введены обобщенные характеристики параметров для теплообменного модуля и дросселя: комплекс $C_x = \frac{(1-x)^2}{3} + x(1-x) + x^2$, учитывающий изменение

скорости пара по мере конденсации; параметр $K = \lambda \frac{l}{d_{тр}}$, включающий в себя

характеристики теплообменных труб; комплекс $L = \xi_{др} n_{тр1}^2 \left(\frac{d_{тр}}{d_{др}} \right)^4$, учитывающий

соотношение потерь в трубах конденсатора и дросселях; комплекс

$M = \frac{w_2}{w_1} = \sqrt{\frac{C_{x1} + \frac{L}{K} x_1^2}{C_{x2} + \frac{L}{K} x_2^2}}$, учитывающий отношения скоростей пара на входе в

секции с неравномерным охлаждением w_2 к секциям с равномерным охлаждением w_1 .

5. Создан экспериментальный стенд для исследования макета конденсатора при неравномерном теплосъеме, приведено описание его элементов и принцип работы; разработаны методика проведения эксперимента и методика обработки полученных экспериментальных данных.

6. Выполнена оценка погрешности измерений: расход пара (критическое сопло) – 1,2%; расход охлаждающей воды (стандартные диафрагмы) – 1,5 %; расход воздуха через ротаметр – 1,5 %; давление пара – 0,2 %; перепад давлений на диафрагмах охлаждающей воды – 0,25 %; температура пара, конденсата, воздуха – 0,5°C. Для рабочих значений давления и температуры пара среднеквадратичное отклонение σ составило около 0,2%, и 0,03% соответственно.

7. Проведены экспериментальные исследования макета конденсатора из двух параллельных каналов при ухудшенном охлаждении одного из них, получены данные о положительном влиянии дросселей, установленных за каждым каналом на линии эжектирования паровоздушной смеси, на работу системы.

8. С увеличением неравномерности охлаждения макета конденсатора располагаемая разность температур $\Delta = t_s - t_{об\text{вх}}$ растет, и работа конденсатора ухудшается. В диапазоне изменения расходов охлаждающей воды одного из

каналов от 100% до 50% рост Δ слабо выражен; при дальнейшем уменьшении расхода воды Δ начинает быстро возрастать. Например, при установке на макете конденсатора дросселей диаметром 3,5 мм и уменьшении расхода воды на первый канал до $\bar{G}_{\text{ов}}=11\%$ располагаемый перепад температур в конденсаторе увеличивается не так сильно, как в вариантах без дросселей, и разница составляет 3,5°C для режимов без присосов воздуха и 2,8°C для режимов с моделированием присосов воздуха в конденсатор.

9. При моделировании присосов воздуха с массовой доле воздуха в паре $\bar{G}_{\text{вз}}$ от 0 до 1,6% в систему конденсатора в условиях неравномерного охлаждения $\bar{G}_{\text{ов}}=25\%$ и установленных дросселях диаметром 3,5 мм располагаемая разность температур Δ уменьшается примерно на 1°C.

10. По результатам испытаний с дросселями, имевшими разные диаметры отверстий 2,7; 3,5; 4,9 мм, установлено наличие оптимального диаметра отверстия для данного макета секционного конденсатора в диапазоне 3 – 4 мм.

11. Расчет оптимального диаметра дросселя для многосекционного воздушного конденсатора пара из 10 секций по разработанной методике показал снижение расхода пара в эжектор на 35% относительно режима без дросселя при размере дросселя 100 мм.

12. Результаты данной работы вносят вклад в понимание процессов работы конденсационных установок ПТУ, в частности ВКУ, в условиях неравномерного теплосъема, возникающего вследствие неравномерного охлаждения из-за воздействия ветра, режимов работы вентиляторов и т.д. Они могут быть использованы для оценки влияния факторов неравномерности на показатели работы конденсационной установки и пути повышения эффективности работы конденсаторов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в научных журналах,
входящих в перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой степени доктора наук (перечень ВАК),
в том числе в научных изданиях, индексируемых базой данных RSCI**

1. Картуесова, А.Ю. Экспериментальное исследование характеристик сопла Лавалья для реактивных турбин / А.Ю. Картуесова, О.О. Мильман, А.Л. Голдин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2023. - № 12. – С. 138-157. – doi: 10.56304/S0040363624010065 (авторство не разделено, 0,9 п.л.);

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

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

4. Картуесова, А.Ю. Особенности работы теплообменных аппаратов с конденсацией пара внутри труб / А.Ю. Картуесова, О.О. Мильман, Е.А. Лошкарева, А.Ю. Калинин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. - № 5-2. – С. 151-160 (авторство не разделено, 0,5 п.л.).

**Публикации в научных изданиях,
индексируемых в международных базах Scopus и/ или Web of Science:**

1. Kartuesova, A.Y., Ptakhin, A.V., Krylov, V.S. (2022). Study of the Orifice Inserts Influence on the Multisection Vacuum Condenser Operation under Heating Conditions. Lecture Notes in Mechanical Engineering. No. 12. Pp. 179-187. doi: 10.1007/978-981-16-9376-2_18 (авторство не разделено, 0,4 п.л.);

2. Kartuesova, A.Y., Milman, O.O., Krylov, V.S., Ptakhin, A.V., Minko, K.B. (2021). Optimizing Parameters of a High-Efficiency Steam Condenser from a Steam-Gas Mixture with a Large Content of Noncondensing Gases. Thermal Engineering. Vol. 61. No. 12. Pp. 930-935. doi: 10.1134/S0040363621120067 (авторство не разделено, 0,3 п.л.);

3. A. Y. Kartuesova, V. S. Krylov, O. O. Mil'man, [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. – 2021. – Vol. 68, No. 12. – P. 930-935. – doi: 10.1134/S0040601521120065 (авторство не разделено, 0,2 п.л.);

4. A. Y. Kartuesova, S. A. Isaev, O. O. Mil'man, A. V. Ptakhin [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. – 2020. – Vol. 93, No. 5. – P. 1077-1088. – doi: 10.1007/s10891-020-02208-2 (авторство не разделено, 0,4 п.л.);

5. A. Y. Kartuesova, O. O. Milman, A. V. Ptakhin [et al.] (2019). Investigation of Parallel Operation of Vacuum Condenser Sections with Nonuniform Cooling // Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 66, No. 2. – P. 77-83. – doi: 10.1134/S0040601519020022 (авторство не разделено, 0,3 п.л.).

**Результаты диссертационного исследования были апробированы
в докладах автора, опубликованных в сборниках материалов
научных конференций:**

1. Картуесова, А.Ю. Особенности системы газоудаления в конденсаторах парогазовой смеси для высокотемпературных турбомашин с утилизацией CO₂ / А. Ю. Картуесова, А. А. Петрушин, А. В. Птахин, П. Ю. Днепровская // Проблемы

газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках : Тезисы докладов XXIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 23–27 мая 2023 года. – Казань: АО Информационно-издательский центр, 2023. – С. 318-319 (авторство не разделено, 0,1 п.л.);

2. Картуесова, А.Ю. Методика расчета и оптимизации параметров высокоэффективного конденсатора пара из парогазовой смеси с большим содержанием неконденсирующихся газов / А.Ю. Картуесова, В.С. Крылов, О.О. Мильман // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках : Тезисы докладов XXIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 23–27 мая 2023 года. – Казань: АО Информационно-издательский центр, 2023. – С. 390-391 (авторство не разделено, 0,1 п.л.);

3. Картуесова, А.Ю. Расчетно-экспериментальное исследование влияния неравномерного теплосъема на совместную работу вакуумного конденсатора пара и газоудаляющего устройства / А. Ю. Картуесова, В. С. Крылов, О. О. Мильман, А. В. Птахин // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену : Материалы конференции. В 2-х томах. Москва, 17–22 октября 2022 года. Том 1. – Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2022. – С. 327-328 (авторство не разделено, 0,1 п.л.).

4. Картуесова, А.Ю. Расчетно-экспериментальное исследование влияния неравномерного теплосъема на совместную работу вакуумного конденсатора пара и газоудаляющего устройства / А.Ю. Картуесова, В.С. Крылов О.О. Мильман, А.В. Птахин, // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену: Материалы конференции. В 2-х томах. Москва, 17–22 октября 2022 года. Том 1. – Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2022. – С. 327-328 (авторство не разделено, 1 п.л.);

5. Картуесова, А.Ю. Расчетно-экспериментальное исследование конденсации пара в условиях неравномерного охлаждения / А.Ю. Картуесова, В.С. Крылов, О.О. Мильман, А.В. Птахин // Современные проблемы теплофизики и энергетики, материалы III международной конференции. – Москва – 2020. – С. 186–187 (авторство не разделено, 0,1 п.л.);

6. Картуесова А.Ю. Экспериментальные исследования конденсации в параллельных каналах при неравномерном теплосъеме / А.Ю. Картуесова, О.О. Мильман // Энергосбережение – теория и практика. Труды Девятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. – 2018. – С. 290–292 (авторство не разделено, 0,15 п.л.);

7. Картуесова А.Ю. Методика расчета распределения потоков пара в секции воздушно-конденсационной установки в условиях полного и ухудшенного охлаждения / А.Ю. Картуесова // Современные тенденции развития науки и технологий. – Белгород. – 2015. – № 6–2. – С. 52–56 (0,2 п.л.).

Подписано в печать 23.07.2024. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 46

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