

На правах рукописи



Неволин Александр Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО
ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛА ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика,
05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена на кафедре «Турбины и двигатели» Уральского энергетического института ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Плотников Петр Николаевич

Официальные оппоненты: **Пиир Адольф Эдвардович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», профессор кафедры теплоэнергетики и теплотехники;

Чекардовский Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции

Ведущая организация: ЗАО Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон», г. Калуга

Защита состоится «03» июня 2016 г. в 12⁰⁰ ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002. г. Екатеринбург. ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=255685>.

Автореферат разослан « » апреля 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аронсон Константин Эрленович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Газотурбинные установки (ГТУ) широко используются в газотранспортной отрасли и малой энергетике. ГТУ представляют собой сложный механизм, состоящий из ряда систем, обеспечивающих его надежную и экономичную работу. Одной из наиболее важных систем ГТУ является маслосистема, обеспечивающая смазку трущихся поверхностей, отвод от них теплоты, подачу рабочего тела в гидравлическую систему регулирования. Поэтому надежность газотурбинного двигателя во многом определяется надежностью работы маслосистемы. Надежность работы последней, определяемая стабильностью параметров масла вне зависимости от режима работы ГТУ и условий внешней среды, в значительной степени зависит от эффективности работы охладителей масла. Недостаточная глубина охлаждения масла приводит к уменьшению его вязкости, снижению толщины масляного клина в подшипниках скольжения и, как следствие, к возможности перехода жидкостного трения к полужидкостному, что снижает КПД турбины газоперекачивающего агрегата (ГПА) и приводит к преждевременному износу оборудования. Таким образом, эффективность и надежность работы маслоохладителя предопределяет эффективность и надежность работы ГТУ.

В газотранспортной отрасли на большинстве ГПА в качестве охладителей масла ГТУ используются аппараты воздушного охлаждения (АВО). Данный тип теплообменников отличается высокой экологичностью и низкими, по сравнению с водяным охлаждением, эксплуатационными затратами. Основным недостатком АВО являются низкие по сравнению с водой теплофизические свойства теплоносителя-воздуха. Это обуславливает низкие коэффициенты теплоотдачи с воздушной стороны, высокие требования к чистоте поверхности обребрения, зависимость от параметров атмосферного воздуха и равномерности его подвода по фронту трубного пучка. В летний период эксплуатации, наряду с высокой температурой окружающей среды, неравномерность подвода охлаждающего воздуха может являться причиной существенного снижения тепловой мощности АВО. При этом аэродинамика входных трактов и влияние неравномерного распределения охладителя по рабочим элементам на теплообмен в АВО не исследованы.

Существенное влияние на работу АВО оказывает движение приземных воздушных масс. АВО масла, расположенные вблизи крупных зданий и соору-

жений компрессорной станции, практически не имеют возможности использовать энергию ветра в целях увеличения тепловой мощности (при работе на режиме естественной конвекции), напротив, при повышенных ветровых нагрузках маслоохладители начинают испытывать негативное влияние рециркуляции. Данное явление применительно к АВО масла не исследовано.

Наряду с отечественными маслоохладителями для охлаждения масла ГТУ применяется большое количество АВО иностранного производства. Отдельные модели импортных АВО обладают нетипичными для нашей промышленности типами оребренной поверхности и интенсификаторами теплоотдачи со стороны масла. В литературе отсутствует информация по зависимостям для расчета теплогидравлических характеристик таких маслоохладителей. Между тем, успешная эксплуатация зарубежных АВО на протяжении длительного периода времени определяет необходимость их исследования.

Цель работы – повышение эффективности работы АВО масла на примере маслоохладителя ГПА ГТН-16 типа 06-10 в условиях эксплуатации на компрессорной станции магистрального газопровода (КС МГ) на основе разработки рекомендаций и формы направляющего аппарата, направленных на повышение тепловой мощности маслоохладителя.

Для достижения указанной цели в ходе исследования поставлен и решен **ряд научно-технических задач:**

- исследование аэродинамики подсекционного пространства типового АВО масла, в частности – определение поля скоростей охлаждающего воздуха в плоскости перед входом в оребрение теплообменной секции;
- исследование влияния неравномерного распределения скорости охлаждающего воздуха по поверхности теплообменной секции на эффективность работы АВО масла;
- определение теплогидравлических характеристик (коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления с воздушной и масляной сторон) маслоохладителя ГПА ГТН-16 типа 06-10;
- исследование влияния движения приземных воздушных масс на работу маслоохладителей, расположенных в окружении цеховых зданий и сооружений, проведенное на примере Краснотурьинского ЛПУ МГ, с целью повышения эффективности их работы в летний период эксплуатации;

- разработка рекомендаций и конструкций, направленных на повышение тепловой мощности АВО масла за счет организации равномерного подвода воздуха к теплообменной секции аппарата и отвода отработавшего воздуха от маслоохладителя.

Научная новизна:

1. Впервые исследована аэродинамика подсекционного пространства АВОм ГПА ГТН-16 типа 06-10. Установлено существенное неравномерное (до 4 раз) распределение скоростей охлаждающего воздуха на входе в теплообменную секцию.

2. Экспериментально доказана возможность повышения тепловой мощности АВОм ГТУ на величину до 11% методом выравнивания профиля скорости подводимого потока охлаждающего воздуха посредством установки специально разработанного направляющего аппарата во входной воздушный тракт.

3. Экспериментально исследованы закономерности процессов теплообмена и гидравлического сопротивления труб с оригинальными турбулизаторами импортного АВО масла типа 06-10. Получены обобщенные зависимости для расчета коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления воздушно-го и масляного трактов теплообменной секции АВО.

4. Разработаны численные конечно-элементные модели межтрубного пространства трубного пучка и подсекционного пространства АВО, позволяющие исследовать теплогидравлические характеристики оребрения и аэродинамику воздушного потока во входном тракте теплообменника соответственно.

5. Разработана численная конечно-элементная модель пространства компрессорной станции, включающая АВО масла в окружении зданий и сооружений, позволяющая исследовать влияние движения приземных воздушных масс на работу маслоохладителя ГПА.

6. По результатам численного исследования, проведенного на примере модели компоновки Краснотурьинского ЛПУ МГ, выявлены условия возникновения рециркуляции отработавшего теплого воздуха, приводящей к снижению тепловой мощности АВО масла ГТУ на величину до 5,5% в летний период эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы:

1. Разработана оригинальная конструкция направляющего аппарата, повышающего тепловую мощность эксплуатируемого АВО масла за счет выравнивания потока охлаждающего воздуха перед оребрением.

2. На основании полученных обобщенных зависимостей уточнена методика теплового и гидравлического расчетов аппаратов воздушного охлаждения с типом теплообменной секции 06-10 и подобных конструкций.

3. Сформулирован комплекс рекомендаций для инженерной практики по учету влияния движения приземных воздушных масс на работу маслоохладителей при проектировании компоновок оборудования компрессорных станций.

4. Для снижения негативного влияния движения приземных воздушных масс на работу АВО масла в летний период эксплуатации, а также повышения тепловой мощности маслоохладителя при работе на режиме свободной конвекции в осенне-весенний период эксплуатации предложено решение в виде установки вытяжных труб на выпускной тракт АВО; при помощи численного моделирования рассчитана оптимальная высота труб.

Методы исследования

Для решения поставленных задач в диссертации использованы основные теоретические положения механики жидкости и газа, основ теплотехники, экспериментальные исследования в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации, численное моделирование методом конечных элементов на основе верифицированных моделей расчета.

Автор защищает:

- результаты сравнительных экспериментальных исследований аэродинамики подсекционного пространства натурального АВО масла типа 06-10 (с установленным разработанным автором направляющим аппаратом и без него);
- обобщенные зависимости для расчета коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления масляного и воздушного трактов теплообменной секции АВО масла типа 06-10 ГПА ГТН-16;
- разработанные численные конечно-элементные модели межтрубного пространства трубного пучка и подсекционного пространства секции АВО масла типа 06-10, а также численную конечно-элементную модель пространства компрессорной станции, включающую АВО масла в окружении зданий и сооружений, предназначенную для исследования влияния движения приземных воздушных масс на работу маслоохладителя ГПА ГТН-16;
- результаты численного исследования влияния движения приземных воздушных масс на работу АВО масла типа 06-10 в летний период эксплуатации;

- практические рекомендации по повышению эффективности работ АВО масла типа 06-10 ГПА ГТН-16 на компрессорной станции МГ.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследований, разработке методик проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации, в разработке и подготовке лабораторного экспериментального стенда, разработке и изготовлении экспериментального образца направляющего аппарата для испытаний в условиях эксплуатации, постановке задач и проведении численных исследований, обобщении результатов экспериментальных и численных исследований, разработке рекомендаций по использованию полученных результатов, научно-техническом обосновании положений, выносимых на защиту.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается высокой точностью применяемых схем измерений на основе метрологического обеспечения средств измерений, хорошей воспроизводимостью экспериментальных результатов и их сходимостью с данными численных исследований; хорошим согласованием полученных зависимостей с результатами исследований других авторов; соответствием полученных результатов с существующими представлениями о структуре течения и методах интенсификации теплообмена в каналах; использованием в работе современных и научно-обоснованных программ и методик численного трехмерного анализа течений в каналах.

Апробация работы

Основные положения работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на: V международной научной конференции «STAR Russian Conference 2010: Компьютерные технологии решения прикладных задач тепло-массопереноса и прочности» (г. Н-Новгород, 2010 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (г. Екатеринбург, 2010 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (г. Екатеринбург, 2011 г.), VII международной научно-практической конференции «STAR Russia 2012: Компьютерные технологии решения прикладных задач тепло-массопереноса и прочности» (г. Н-Новгород, 2012 г.), XXXIII-ей всероссийской конференции по проблемам науки и технологий (г. Миасс, 2013 г.), Конференции с международным участием «VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (г. Екатеринбург,

2013 г.), VIII международном симпозиуме по фундаментальным и прикладным проблемам науки (г. Миасс, 2013 г.), XXXVIII международной научно-практической конференции «Технические науки - от теории к практике» (Новосибирск, 2014 г.), Международной научно-практической конференции "Материаловедение. Машиностроение. Энергетика." в рамках промышленной выставки "ИННОПРОМ-2015" (г. Екатеринбург, 2015 г.).

Публикации. Основные научные положения и выводы изложены в 11 печатных работах, в том числе в трех публикациях в научных журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, определенных ВАК.

Реализация результатов работы

Ряд рекомендаций и конструкций, разработанных на основании результатов численных исследований и результатов экспериментов, проведенных в условиях эксплуатации на маслоохладителях ГПА ГТН-16 Карпинского и Краснотурьинского ЛПУ МГ ООО «Газпром трансгаз Югорск» и направленных на повышение эффективности работы маслоохладителей в летний период эксплуатации, приняты к рассмотрению руководством ООО «Газпром трансгаз Югорск» для внедрения в производство.

Отдельные результаты работы используются в научно-исследовательской деятельности и учебном процессе подготовки бакалавров и магистров кафедры «Турбины и двигатели» УрФУ при чтении курсов «Информатика, раздел «Моделирование теплогидравлических процессов»», «Механика жидкости и газа», «Теплообменники энергетических установок».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованной литературы, включающего 146 наименований. Работа изложена на 138 страницах, содержит 67 рисунок, 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, вынесенные на защиту, изложено краткое содержание работы.

В *первой главе* представлен обзор литературы по теме исследования. Основная часть главы посвящена вопросу равномерного распределения потока

охлаждающего воздуха по поверхности теплообменной секции аппарата воздушного охлаждения, как способу повышения тепловой мощности теплообменника. Приводится обзор методов выравнивания эпюр скоростей потока газа в каналах. Основное внимание уделено методам выравнивания профиля скорости после прохождения потоком диффузорных и поворотных каналов, характерных для исследуемых в диссертации аппаратов воздушного охлаждения масла.

Во второй части главы приводится обзор основных типов развитых поверхностей оребрения и внутритрубных турбулизаторов потока, применяемых для интенсификации процесса теплообмена. Акцентируется внимание на том, что большинство разработанных интенсификаторов на данный момент промышленностью не используется по причине сложности изготовления, повышенного гидравлического сопротивления и, что немаловажно, ввиду невозможности поддержания паспортных характеристик при помощи простых и экономичных методов очистки.

Проводится анализ влияния приземных воздушных масс на работу аппаратов воздушного охлаждения масла, используемых на КС МГ. В отличие от АВО газа, располагаемых на отдельной площадке, АВО масла, находящиеся в окружении зданий и сооружений КС, практически не могут использовать энергию ветра в целях увеличения тепловой мощности при работе на режиме естественной конвекции. Напротив, обтекание воздушными потоками крупногабаритных сооружений, расположенных около АВО масла, создает возможность возникновения рециркулирующих течений, подмешивающих теплый, отработавший в АВО, воздух обратно в воздухозаборный тракт маслоохладителей, снижая тем самым их тепловую мощность.

В заключении главы сформулированы основные задачи исследований.

Во *второй главе* представлены методика проведения экспериментальных исследований АВО масла ГПА ГТН-16 в условиях эксплуатации, результаты экспериментальных и численных исследований. В качестве объекта исследования выбран АВО масла типа 06-10 (Рисунок 1) импортного производства. На данный момент в газотранспортной отрасли эксплуатируется несколько сотен таких теплообменников. В основном данным маслоохладителем укомплектовывались газотурбинные установки производства ЗАО «Уральский турбинный завод» (более 350 ГТУ).



Рисунок 1 – АВО масла ГТУ ГТН-16
Краснотурьинского ЛПУ МГ

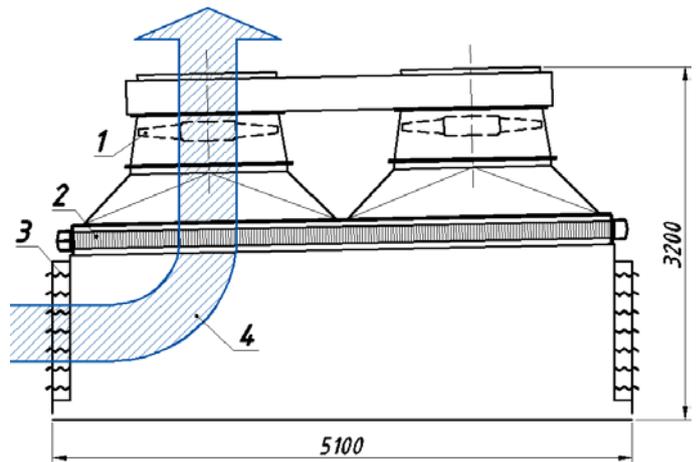


Рисунок 2 – Секция АВО масла:
1 – вентилятор; 2 – трубный пучок, 3 – жалюзи,
4 – направление движения воздушного потока

Маслоохладитель представляет собой аппарат всасывающего типа с верхним расположением вентиляторов. Теплообменная секция расположена горизонтально, схема движения теплоносителей – перекрестный противоток. Как объект для исследования влияния равномерности распределения потока охлаждающего воздуха на теплообмен данный маслоохладитель интересен по причине наличия поворачивающегося входного воздушного тракта, расширяющегося в направлении движения воздушного потока (Рисунок 2). Последнее определяет повышенную неравномерность потока воздуха на входе в теплообменную секцию. В дополнение к этому данный АВО масла имеет нетипичные для российской промышленности внутритрубные интенсификаторы теплообмена и оребрение типа Форго. Несмотря на длительный период эксплуатации, (у большинства АВО – порядка 30 лет), данные интенсификаторы и оребрение не были исследованы.

Для определения характера неравномерности распределения полей скоростей воздуха непосредственно перед теплообменной секцией, были проведены численное моделирование и экспериментальные исследования в условиях эксплуатации на АВО масла ГТУ ГТН-16 Краснотурьинского ЛПУ МГ.

Экспериментальное исследование проведено на летнем режиме эксплуатации при работающих вентиляторах и полностью открытых жалюзи. Оребрение АВО перед испытаниями было промыто. Измерения были проведены в сухую безветренную погоду. В виду того, что секции в группе АВО не отделены друг от друга (имеют единое пространство под рамами), для проведения измерений была выбрана средняя секция. Данная мера позволила получить более общую картину аэродинамики течения воздуха с учетом влияния на исследуемое поле скоростей

потоков, исходящих от соседних вентиляторов. Ввиду симметричности секции АВО относительно продольной и поперечной плоскостей, измерения проводились только на четверти фронта оребрения (Рисунок 3). Измерения скорости производились при помощи термоанемометра “testo 425” с типом датчика – “обогреваемая струна”. Прибор позволяет снимать показания с разрешением 0,01 м/с, с погрешностью $\pm 0,03$ м/с + 5% от измеренного среднего по времени значения. Для позиционирования датчика прибора предварительно на поверхность оребрения нитями была нанесена контрольно-измерительная сетка с шагом 200 мм. При размерах 1200x2400 мм сетка насчитывала 91 контрольную точку (Рисунок 3, 4).

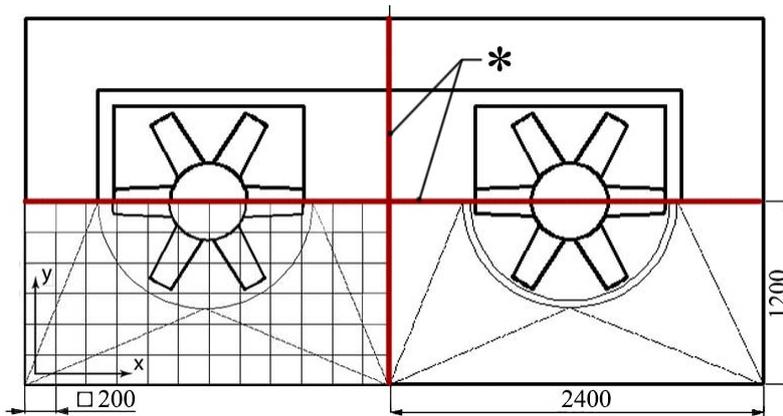


Рисунок 3 – Секция АВО масла (вид сверху) и схема контрольной сетки; * – плоскости симметрии



Рисунок 4 – Контрольная сетка, на поверхности оребрения

При измерении датчик прибора, закрепленный на телескопической штанге, помещался непосредственно под точку (перекрестие) контрольной сетки на расстоянии 5-10 мм от оребрения, перпендикулярно фронтальной поверхности теплообменной секции. Ввиду нестационарности потока, в каждой точке производились многократные измерения (20 измерений за 10 секунд на каждую точку) с последующим усреднением результатов по времени в автоматическом режиме. Для обеспечения достоверности получаемых результатов замеры были проведены три раза и усреднены. Результаты исследований выявили достаточно большую неравномерность потока воздуха на фронте оребрения: минимальные и максимальные значения скоростей воздуха для различных участков секции аппарата различаются в 3,5-4,0 раза (Рисунок 5).

Для численного исследования аэродинамики воздушного тракта была разработана полноразмерная трехмерная модель четверти АВО масла. Для снижения аппаратных затрат было принято решение заменить густо оребренный трубный пучок модели пористым телом с эквивалентными по отношению к оребрению гидравлическими характеристиками.

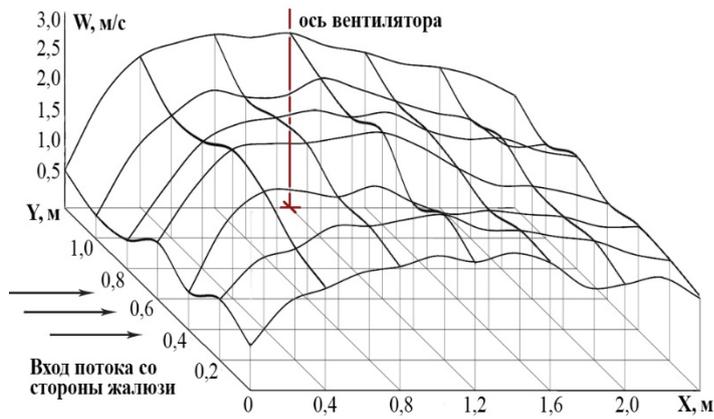
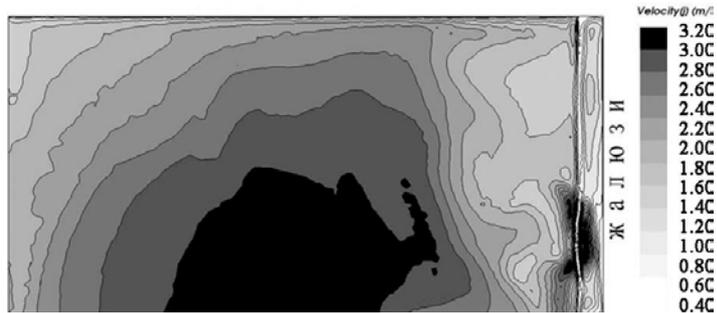
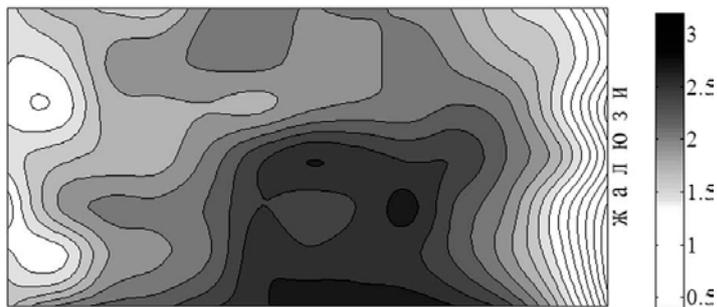


Рисунок 5 – Поле скоростей воздуха на входе в теплообменную секцию (экспериментальные данные)



а



б

Рисунок 6 – Поля скоростей воздуха на входе в теплообменную секцию АВОм: а – результат моделирования; б – результат экспериментального исследования

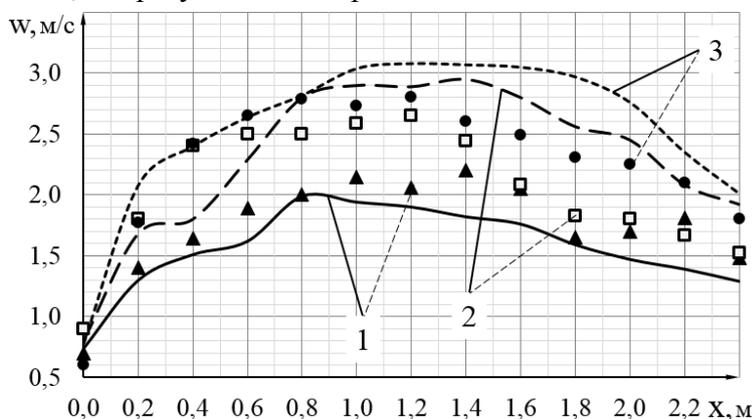


Рисунок 7 – Сопоставление результатов моделирования и эксперимента; распределение скорости потока воздуха по фронту оребрения: 1,2,3 – данные расчета, ▲, □, ● – данные эксперимента в сечениях $Y=0$ м, $Y=0,6$ м, $Y=1,2$ м соответственно (см. рисунок 5)

Данные экспериментального и численного исследования хорошо согласуются между собой (Рисунок 6, 7). Относительное отклонение в среднем составило 15,1%. Наибольшая скорость воздуха составила 2,8 м/с (3,2 м/с по данным моделирования), она фиксировалась по центру трубного пучка в зоне оси вентилятора (Рисунок 7). В начале теплообменной секции отмечена «застойная» зона со скоростями потока 0,3-0,9 м/с (0,5-1,5 м/с по результатам моделирования). Эта область занимает от 8 до 10% от фронтальной площади трубного пучка.

В *третьей главе* представлены результаты экспериментального и численного исследования теплогидравлических характеристик масляного и воздушного тракта теплообменной секции АВО масла типа 06-10: приведены описание экспериментального стенда, методика проведения эксперимента, результаты экспериментального и численного исследования, расчет погрешностей исследования.

В трубках исследуемого АВО используется составной интенсификатор, выполненный из трех одинаковых элементов U-образной формы в поперечном сечении (Рисунок 8). Каждый элемент в своей периферийной части имеет регулярную гребенку, выполненную под углом 45° , по отношению к оси трубки, направлению (Рисунок 9). В трубу интенсификатор устанавливается с натягом, плотный контакт со стенкой труб обеспечивается пружинящей гребенкой. Данная внутренняя вставка выполняет три функции: оттесняет поток от центра канала к его стенкам, способствует турбулизации течения в пристеночном слое и является внутренним оребрением. Турбулизация потока происходит в области гребенки за счет прерывания поверхности, перетечки через гребенку отсутствуют. Фактически поток разделяется на отдельные независимые струи. На основании этого было принято решение рассчитывать эквивалентный гидравлический диаметр, используя параметры каналов, образованных данным интенсификатором.

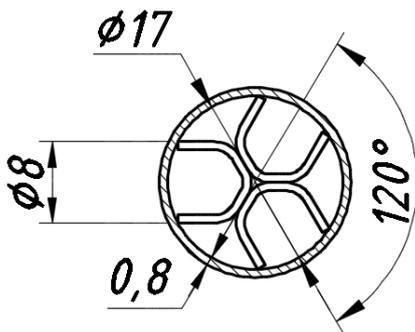


Рисунок 8 – Трубка с интенсификатором теплоотдачи

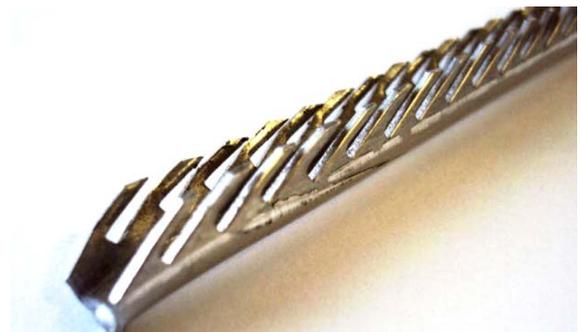


Рисунок 9 – Элемент интенсификатора

Исследования проведены на экспериментальном стенде, состоящем из трех контуров (Рисунок 10): контур горячего теплоносителя (масляный), холодного теплоносителя (водяной) и вспомогательный контур (водяной) для нагрева масла. Двигаясь по своему контуру, масло забиралось насосом из маслобака (5) и подавалось в теплообменник типа «труба в трубе» (7), где нагревалось до необходимой температуры. Далее масло, пройдя бак-ресивер (на схеме не показан), поступало в экспериментальный модуль (2). Измерение расхода масла осуществлялось объемным методом, посредством измерительного бака, установленного перед сливом масла в маслобак и таймера. Расход масла, проходящего через экспериментальный модуль, задавался положением кранов на основной магистрали и байпасе и производительностью насоса. Контур холодного теплоносителя разомкнутый: вода поступала из водопровода и, отработав в установке, сбрасывалась в систему канализации. Подача охлаждающей воды была ор-

ганизована по гравитационной схеме с помощью напорного бака (1), расположенного над установкой. Создаваемый статический напор воды поддерживался на одном уровне за счет отверстия перелива. Измерение расхода воды также осуществлялось объемным способом. Вспомогательный водяной контур, используемый для нагрева масла, замкнутый, имел в своем составе бак с электронагревателем (6). Температура воды, поступающей в теплообменник, регулировалась и поддерживалась на заданном уровне посредством электроконтактного термометра типа ТПК, включенного в схему питания нагревателя. Вода прокачивалась по контуру при помощи циркуляционного электронасоса.

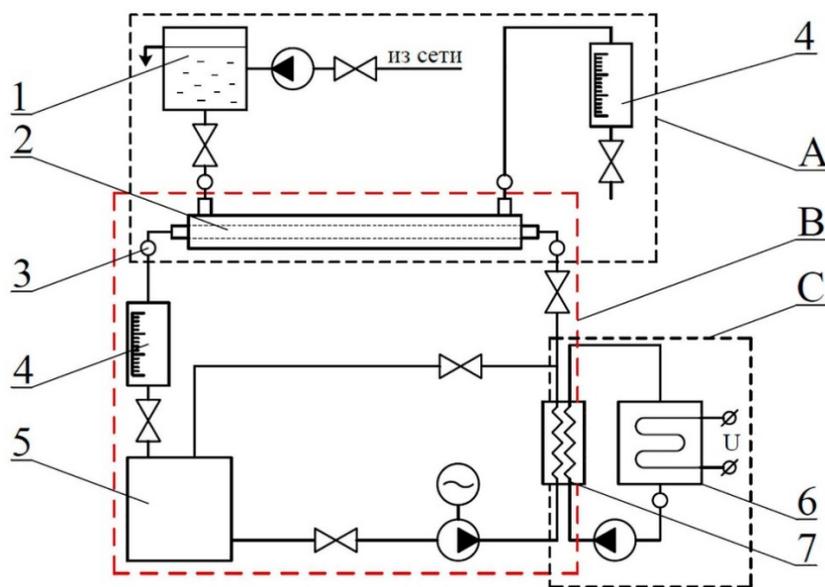


Рисунок 10 – Схема экспериментального стенда:

А – контур охлаждающей воды, В – масляный контур, С – водяной контур, нагревающий масло. 1 – напорный бак, 2 – экспериментальный модуль, 3 – точка измерения температуры, 4 – мерный бак, 5 – маслобак, 6 – бак с электронагревателем, 7 – теплообменник для нагрева масла

Основной элемент стенда – экспериментальный модуль (2), представлял собой теплообменник типа «труба в трубе» (Рисунок 11).

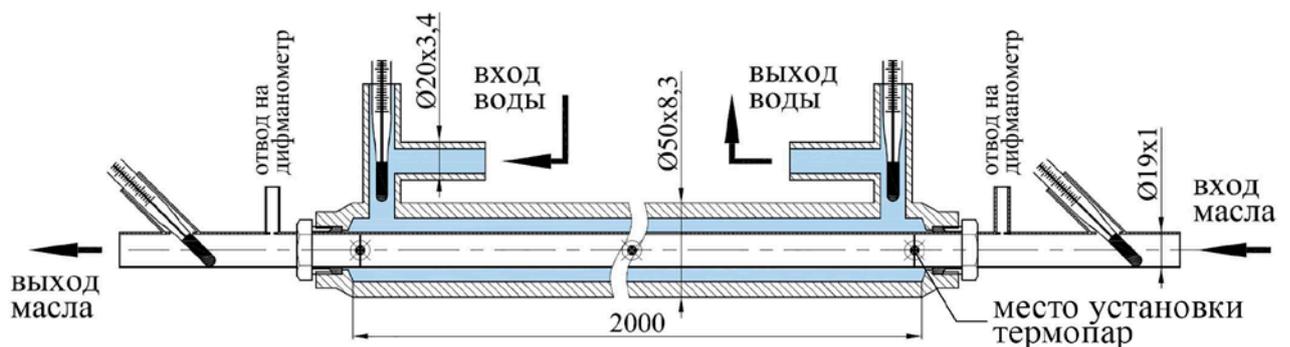


Рисунок 11 – Экспериментальный модуль

Длина рабочего участка теплообменника составляла 2 м. Движение теплоносителей противоточное. Направление теплового потока в модуле соответствовало направлению теплового потока в реальном АВО масла: во внутренней исследуемой трубке течет горячее турбинное масло, в кольцевом канале – охлаждающая вода. Модуль снабжен узлами измерения температуры масла и

воды на входе и выходе из теплообменника. Для снижения тепловых потерь снаружи корпус покрыт теплоизоляцией из вспененного полиэтилена.

Для измерения температуры использовались термометры лабораторные типа ТЛ-4. Температура стенки внутренней трубки измерялась в трех сечениях (в начале, середине и конце рабочего участка) с помощью девяти хромель-копелевых термопар, зачеканенных в стенку трубы (в каждом сечении по 3 термопары). Для измерения разницы потенциалов термопар использовался вольтметр дифференциальный В1-12. Для измерения гидравлического сопротивления непосредственно до и после рабочего участка в масляный тракт были установлены отводы на П-образный дифференциальный манометр.

Диапазон скоростей масла, реализованный в эксперименте, перекрывал рабочий диапазон скоростей маслоохладителя на $\pm 15\%$. Температура масла поддерживалась на одном уровне – $+50^\circ\text{C}$. Расход охлаждающей воды во время измерений не менялся, контролировалась постоянная температура воды на входе в модуль.

Для повышения точности определения коэффициента гидравлического сопротивления была проведена дополнительная серия измерений перепада давления масла для температур потока $40, 50$ и 60°C при условии изотермного течения.

Достоверность получаемых результатов контролировались в процессе снятия показаний по тепловому балансу. По итогам проведения серии экспериментов среднее расхождение по тепловому балансу составило $3,5\%$, при максимальном расхождении $7,0\%$, максимальные относительные погрешности определения коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления не превысили $5,2$ и $3,4\%$ соответственно.

На основании экспериментальных данных были получены зависимости для расчета теплоотдачи и гидравлического сопротивления масла при движении его в трубе с внутренней вставкой (Рисунок 12, 13).

Экспериментальная зависимость для числа Нуссельта представлена в сопоставлении с формулой $Nu = 0,15Re^{0,33}Pr^{0,43}Gr^{0,1}(Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}$ в модифицированном виде $Nu^* = Nu / (Pr_{ж}^{0,43}Gr_{ж}^{0,1}(Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25})$, где Nu^* – модифицированное число Нуссельта. Полученная обобщенная экспериментальная зависимость имеет вид $Nu^* = 0,23Re^{0,25}$. Зависимость справедлива для диапазона: $20 < Re < 100$ и $300 < Pr_{ж} < 400$, характерных для эксплуатационного режима масляного тракта АВО. Полученная в зависимость для коэффициента

гидравлического трения имеет вид $\zeta = 91/Re$. Результаты обработки экспериментальных данных представлены в сопоставлении с данными, полученными по формулам Башта и Пуазейля (Рисунок 13).

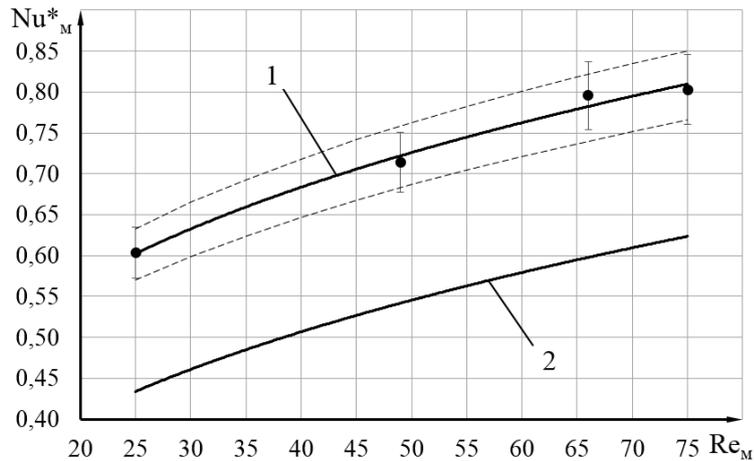


Рисунок 12 – Сопоставление результатов исследования теплоотдачи:

1 – аппроксимация экспериментальных данных $Nu^*=0,25Re^{0,27}$;
2 – результаты, полученные по расчетной зависимости $Nu^*=0,15Re^{0,33}$

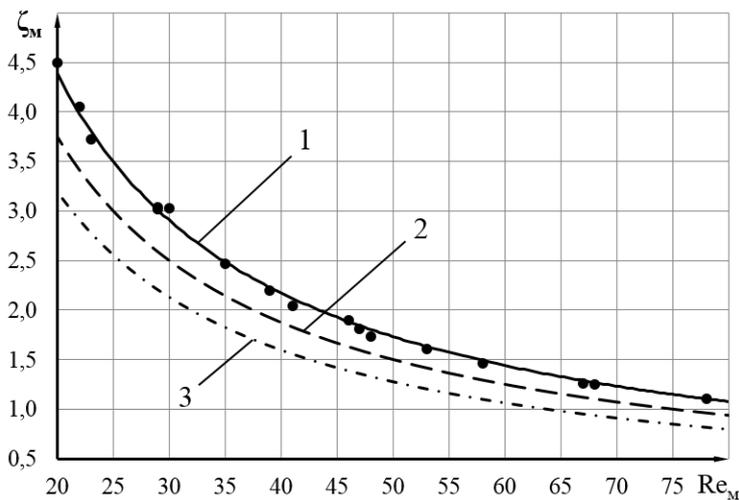


Рисунок 13 – Сопоставление результатов исследования гидравлического сопротивления:

1 – аппроксимация экспериментальных данных $\zeta=91/Re$;
2 – результаты, полученные по формуле Башта $\zeta=75/Re$;
3 – результаты, полученные по формуле Пуазейля $\zeta=64/Re$

Для моделирования воздушного тракта теплообменной секции была разработана модель элемента трубного пучка, представляющая собой фрагмент оребрения, заключенный между двумя плоскостями, проходящими через оси соседних теплообменных труб (Рисунок 14). Задача решалась в стационарной, трехмерной постановке. В качестве среды был задан сухой воздух,двигающийся в ламинарном режиме в диапазоне чисел Рейнольдса 50...1250 и в переходном режиме в диапазоне чисел Рейнольдса 1250...1980. При этом диапазон скоростей потока, задаваемых на входе в модель (0,1...4 м/с) соответствовал рабочему диапазону скоростей воздуха на входе в оребрение АВО, перекрывая последний более чем на $\pm 30\%$. Для моделирования переходного режима использовалась k-w SST модель турбулентности.

В качестве основных результатов серии продувок были получены обобщенные зависимости теплоотдачи $Nu = 0,035Re^{0,765}$, $Nu = 0,199Re^{0,529}$ (Рисунок 15) и аэродинамического сопротивления $Eu = 205,2Re^{-0,58}$,

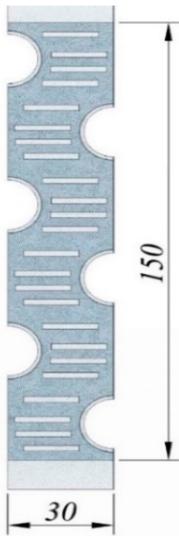


Рисунок 14 –
Модель элемента
трубного пучка

$Eu = 61,9Re^{-0,395}$ (Рисунок 16) для ламинарного и переходного режимов соответственно. Полученные данные удовлетворительно соответствуют экспериментальным значениям, полученным другими авторами на подобном оребрении.

Дополнительно получена зависимость падения давления на трубный пучок от скорости воздуха в перед оребрением $\Delta P = 7,792w^2 + 14,189w$. Константы данного уравнения, отнесенные к длине ребра, представляют собой коэффициенты инерционного $P_i = 51,95 \text{ кг/м}^4$ и вязкостного $P_v = 94,59 \text{ кг/(м}^3\text{с)}$ сопротивления, необходимые для задания аэродинамических характеристик пористого тела, замещающего трубный пучок в численных исследованиях аэродинамики АВОМ.

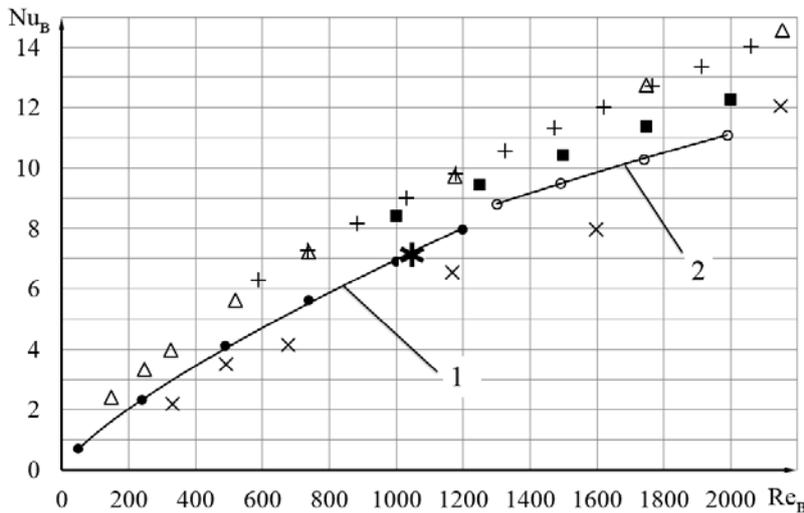


Рисунок 15 – Сопоставление результатов исследования теплоотдачи к воздуху в межтрубном пространстве: данные расчета: 1 – ламинарный режим: $Nu=0,035Re^{0,765}$, 2 – турбулентный режим $Nu=0,199Re^{0,529}$; экспериментальные данные других исследователей: ■ – Зозуля, Δ – Ван, \times – Каянсаян, + – Trane Co (поверхность КСР-2). * – данные промышленного эксперимента.

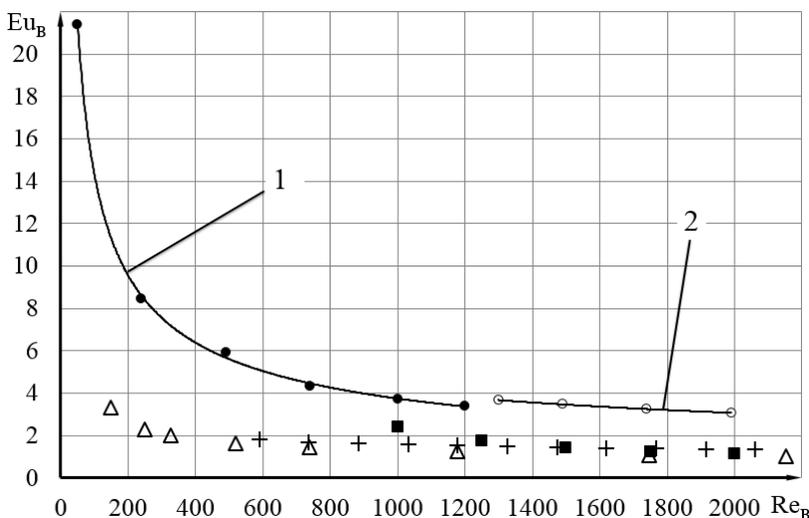


Рисунок 16 – Сопоставление результатов исследования аэродинамического сопротивления трубного пучка: данные расчета: 1 – ламинарный режим, $Eu=205,2Re^{-0,58}$, 2 – турбулентный режим $Eu=61,9Re^{-0,395}$, экспериментальные данные других исследователей: ■ – Зозуля, Δ – Ван, + – Trane Co (поверхность КСР-2).

Рассчитанный на основании полученных зависимостей коэффициент теплопередачи теплообменника $k=22,05 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ хорошо соответствует значениям, полученным при обработке паспортных данных и данных эксперимента, прове-

денного в условиях эксплуатации, превосходя последние на 5,0% и 1,8% соответственно, что свидетельствует о точности полученных в ходе исследования зависимостей и позволяет рекомендовать их для расчета подобных поверхностей теплообмена.

В *четвертой главе* представлены результаты сравнительных испытаний работы АВО масла с направляющим аппаратом (НА), предназначенным для выравнивания существующего поля скоростей, и без него. Разработка геометрии поверхностей НА производилась автором при помощи верифицированной экспериментом в условиях эксплуатации конечно-элементной модели.

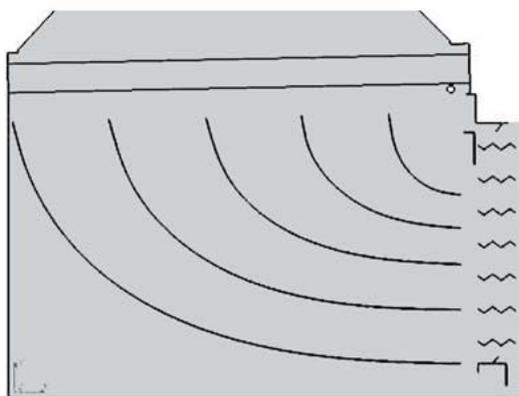


Рисунок 17 – Модель направляющего аппарата воздушного потока

В результате вариантных расчетов было предложено несколько вариантов конструкций НА, отличающихся количеством, формой и расположением направляющих поверхностей. Для экспериментального исследования был отобран вариант (Рисунок 17), оптимальный с позиции соотношения выравнивания потока воздуха, простоты конструкции и технологичности изготовления.

Изготовленный на основании модели направляющий аппарат прошел испытания в условиях эксплуатации на АВО масла ГТУ ГТН-16 Карпинского ЛПУ МГ (Рисунок 18). Испытания проводились с целью исследования поля скоростей воздуха перед теплообменной секцией, после прохода воздухом НА



Рисунок 18 – Направляющий аппарат, установленный в подсекционном пространстве АВО

и оценки влияния НА на тепловую мощность АВО. Во время испытаний определялись температуры теплоносителей на входе и выходе АВО до и после установки направляющего аппарата, расходы воздуха и масла, и поле скоростей воздуха перед оребрением. Температура масла измерялась термометрами лабораторными типа ТЛ-50, установленными в гильзы, сваренные во входной и выходной патрубки теплообменной секции. Температура воздуха измерялась термопарой термоанемометра “testo 425” в нескольких точках на входе (перед системой жалюзи) и на выходе (после вентилятора) и далее усреднялась.

и оценки влияния НА на тепловую мощность АВО. Во время испытаний определялись температуры теплоносителей на входе и выходе АВО до и после установки направляющего аппарата, расходы воздуха и масла, и поле скоростей воздуха перед оребрением. Температура масла измерялась термометрами лабораторными типа ТЛ-50, установленными в гильзы, сваренные во входной и выходной патрубки теплообменной секции. Температура воздуха измерялась термопарой термоанемометра “testo 425” в нескольких точках на входе (перед системой жалюзи) и на выходе (после вентилятора) и далее усреднялась.

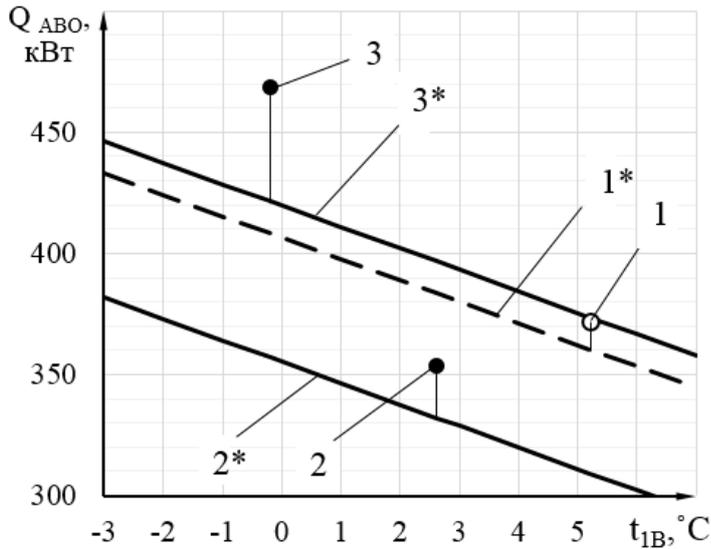


Рисунок 19 – Тепловая мощность секции АВО масла (сопоставление результатов эксперимента с паспортными данными): 1, 1* – результат измерения до установки НА и соответствующая режиму паспортная характеристика; 2, 3 – результаты измерения после установки НА, 2*, 3* – соответствующие режимам измерения паспортные характеристики

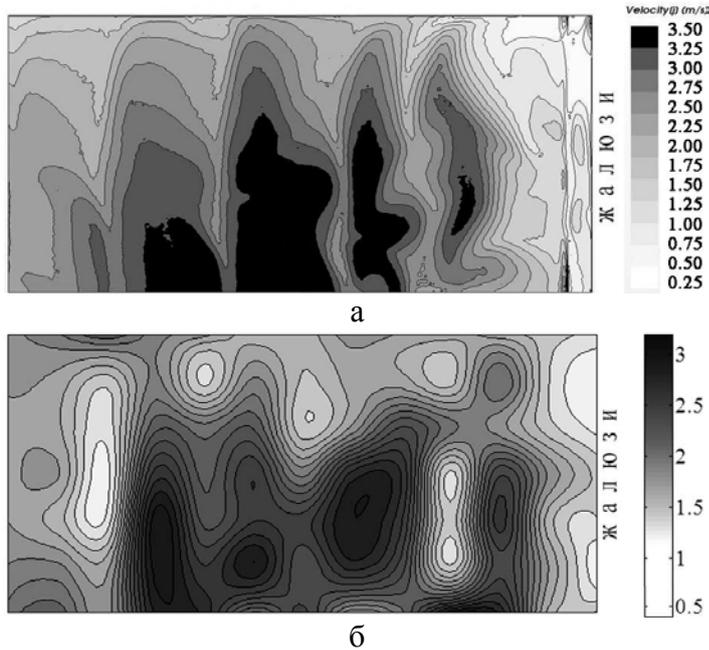


Рисунок 20 – Результат исследования поля скоростей потока воздуха на входе в теплообменную секцию с установленным направляющим аппаратом: а – моделирование, б – эксперимент

Средняя скорость потока в застойной зоне, расположенной сразу за входными жалюзи, была повышена с 0,6 м/с до 1,3 м/с. Степень неравномерности потока снизилась с 0,36 до 0,29 (на 19,4%). В двух измерениях, проведенных после установки НА на разных режимах, отличающихся между собой начальными температурами теплоносителей, было зафиксировано увеличение тепловой мощности секции АВО масла на 6,4% (Рисунок 19 2, 2*)

Максимальное относительное отклонение экспериментальных значений расхода воздуха от паспортных данных вентилятора составило 2,7%. Значение расхода масла для расчетов было взято из паспортных данных насоса и проверено ультразвуковым расходомером. Испытания проводились в безветренную погоду, без осадков, при температуре окружающего воздуха $-1...+5$ °С и температуре масла перед АВОм $+40...+47,5$ °С. Во время испытаний ГТУ работала на номинальном режиме, вентиляторы маслоохладителя были включены, жалюзи открыты.

По результатам измерений было выявлено, что без НА теплообменник работает согласно паспортной характеристике (Рисунок 19 1, 1*), отклонение от паспортных данных составило 3,1%. За счет установки НА было достигнуто более равномерное распределение скоростей по поверхности трубного пучка (Рисунок 20). Средняя скорость потока в застойной зоне, расположенной сразу за входными жалюзи, была повышена с 0,6 м/с до 1,3 м/с. Степень неравномерности потока снизилась с 0,36 до 0,29 (на 19,4%). В двух измерениях, проведенных после установки НА на разных режимах, отличающихся между собой начальными температурами теплоносителей, было зафиксировано увеличение тепловой мощности секции АВО масла на 6,4% (Рисунок 19 2, 2*)

при $t_{в1} = +2,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_{м1} = 40,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ и на 11,2% (Рисунок 19 3, 3*) при $t_{в1} = -0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_{м1} = 47,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

В процессе проведения экспериментальных исследований АВО масла было установлено влияние на работу маслоохладителя скорости и направления атмосферных воздушных потоков. В связи с этим было проведено численное исследование влияния движения приземных воздушных масс на работу АВО. Исследование проведено для пятисекционного АВО масла в реальном окружении зданий и сооружений Краснотурьинского ЛПУ МГ. Для моделирования работы АВОм были выбраны условия июля, как периода эксплуатации с наиболее высокими температурами окружающего воздуха (до $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ и более). Исследовалось снижение тепловой мощности АВО по причине рециркуляции воздушных потоков при наиболее вероятных и наиболее неблагоприятных, с точки зрения роста влияния рециркуляции на работу АВО, направлениях ветра. Скорость воздушных потоков задавалась 5 м/с , при температуре окружающего воздуха $30 \text{ } ^\circ\text{C}$. Температура воздуха на выходе из маслоохладителя задавалась $42 \text{ } ^\circ\text{C}$, что соответствует температуре масла на входе $65 \text{ } ^\circ\text{C}$ и температуре окружающего воздуха $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ при работе пятисекционного маслоохладителя ГТН-16 со всеми работающими вентиляторами и открытыми жалюзи.

Результаты исследования показали, что при наиболее вероятном северном ветре с подветренной стороны АВО образуется небольшой вихрь, подмешивающий теплый воздух в две из пяти секций маслоохладителя (Рисунок 21 а).

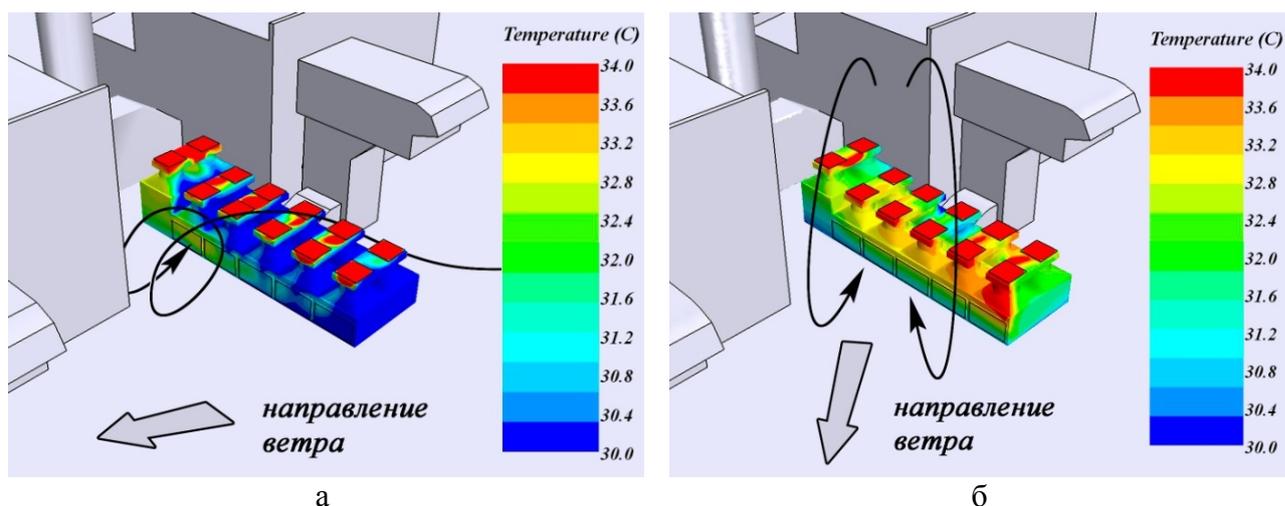


Рисунок 21 – Результаты исследования поля температур в зоне воздухозаборов АВО: подветренная сторона АВО: а – при северном ветре, б – при западном ветре

Снижение тепловой мощности АВО при этом достигает 2,5-2,8%. При западном направлении ветра, возникающем достаточно редко, но при этом оказывающем наиболее негативное влияние на работу АВО, теплообменник целиком

охватывается зоной рециркуляции (Рисунок 21 б). Тепловая мощность при этом снижается на 5,1-5,5%.

В качестве рекомендации по снижению негативного влияния рециркуляции на работу АВО для условий Краснотурьинского ЛПУ МГ было предложено установить на выходной тракт маслоохладителей вытяжные трубы, позволяющие вывести поток теплого отработавшего в АВО воздуха из зоны рециркуляции. Методом численного моделирования было получено, что для снижения влияния рециркуляции, высота труб должна составлять 3м – для северного направления ветра (влияние рециркуляции исключается полностью) и минимум 7 м – для западного направления ветра, при этом снижение теплосъема АВО за счет рециркуляции достигает не более 1%. В осенне-весенний период эксплуатации вытяжные трубы могут использоваться при работе АВОм на режиме естественной конвекции для усиления эффекта самотяги.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Установлено экспериментальным исследованием в условиях эксплуатации существенное неравномерное распределение потока охлаждающего воздуха на входе в теплообменную секцию АВО масла вытяжного типа с верхним расположением вентиляторов. Отношение средних значений скоростей в области под вентилятором и на периферии трубного пучка достигает 3,5-4 раза. Максимальное и минимальное значения скорости отличаются в более чем в 9 раз.

2. Разработана методика проведения численного исследования аэродинамики воздушного тракта АВО масла. Численная конечно-элементная модель верифицирована сопоставлением с результатами эксперимента, проведенного в условиях эксплуатации. Отклонение результатов моделирования от данных экспериментального исследования составляет в среднем 15%.

3. Разработана конструкция направляющего аппарата, способствующая повышению эффективности работы АВО масла ГТУ ГПА за счет выравнивания потока охлаждающего воздуха в плоскости перед входом в теплообменную секцию маслоохладителя. Эффективность направляющего аппарата подтверждена экспериментально в условиях эксплуатации: установлена возможность повышения тепловой мощности АВО масла за счет установки направляющего аппарата на величину до 11%. Увеличение тепловой мощности маслоохладителя повышает надежность работы маслосистемы турбоустановки и надежность и эффективность работы ГТУ в целом в летний период эксплуатации.

Предложенный вариант конструкции направляющего аппарата, отличающийся простотой конструктивного исполнения и монтажа на месте эксплуатации, может быть рекомендован к использованию для повышения эффективности работы аппаратов воздушного охлаждения масла методом выравнивания поля скоростей охлаждающего воздуха перед входом в теплообменную секцию.

4. Результаты проведенной оценки экономической эффективности внедрения разработанного направляющего аппарата в производство, позволяют рассматривать установку направляющего аппарата как экономически целесообразный проект, способный противостоять экономическим рискам.

5. Методом численного моделирования и экспериментальным исследованием в лабораторных условиях теплогидравлических процессов трубного пучка АВО типа 06-10 получены зависимости для расчета теплоотдачи и гидро- и аэродинамического сопротивления масляного и воздушного трактов маслоохладителя. Результаты расчета по полученным зависимостям коэффициента теплопередачи АВО хорошо соответствуют данным паспортной характеристики теплообменника и результатам промышленного эксперимента, отличаясь от последних на 5,0% и 1,8% соответственно, и могут, по нашему мнению, быть использованы для расчета подобных теплообменников, в частности для расчета воздушно-конденсационных установок системы Геллера.

6. Разработана численная конечно-элементная модель, позволяющая исследовать влияние движения приземных воздушных масс на работу АВО масла ГТУ находящегося в окружении цеховых зданий и сооружений. По результатам исследования выявлены условия, приводящие к возникновению около АВОм рециркулирующих течений, приводящих к снижению тепловой мощности маслоохладителя за счет подмешивания теплого отработавшего в АВОм воздуха обратно во входной тракт теплообменника. Показано, что снижение тепловой мощности АВОм за счет рециркуляции при определенных условиях в летний период эксплуатации может достигать значения 5,5% в свою очередь, может приводить к недостаточной глубине охлаждения масла ГТУ.

7. Разработаны рекомендации для инженерной практики направленные на повышение эффективности работы АВО масла ГПА ГТН-16 за счет снижения влияния движения приземных воздушных масс на работу АВО масла как при проектировании компоновок новых компрессорных станций, так и при реконструкции работающих АВО.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Неволин А.М. Исследование эффективности работы аппаратов воздушного охлаждения масла ГТУ/ А.М. Неволин, П.Н. Плотников // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 26-29 (0,42 п.л. / 0,38 п.л.).

2. Неволин А.М. Повышение эффективности аппаратов воздушного охлаждения масла газоперекачивающих агрегатов на базе газотурбинной установки ГТН-16 / А.М. Неволин, П.Н. Плотников // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия Энергетика. – 2014. – т.14. – № 4. – С. 11-17 (0,75 п.л. / 0,68 п.л.).

3. Неволин А.М. Влияние розы ветров на работу аппаратов воздушного охлаждения масла ГТУ / А.М. Неволин, Ю.С. Хабибуллина, П.Н. Плотников // Промышленная энергетика. – 2015. – №1. – С. 38-42 (0,58 п.л. / 0,46 п.л.).

Работы по теме диссертации, опубликованные в других изданиях:

4. Неволин А.М. Исследование эффективности работы аппаратов воздушного охлаждения масла. В кн.: Теплофизика и энергетика: сб. науч. ст. / А.М. Неволин, П.Н. Плотников, А.В. Скороходов. – Магнитогорск: МаГУ, 2010. – С. 74-79 (0,72 п.л. / 0,61 п.л.).

5. Неволин А.М. Исследование эффективности работы аппаратов воздушного охлаждения масла. В кн.: Сборник материалов V международной научной конференции международной научной конференции «STAR Russian Conference 2010: Компьютерные технологии решения прикладных задач тепломассопереноса и прочности» / А.М. Неволин. – Н-Новгород: СИНЦ, 2010. – С. 22-26 (0,4 п.л. / 0,4 п.л.).

6. Неволин А.М. Теплогидравлический анализ работы теплообменного аппарата воздушного охлаждения. В кн.: Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых / А.М. Неволин, П.Н. Плотников. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – С. 137-139 (0,18 п.л. / 0,16 п.л.).

7. Неволин А.М. Модернизация конструкции аппарата воздушного охлаждения масла. В кн.: Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник материалов Всероссийской

студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых / А.М. Неволин, П.Н. Плотников. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – С. 166-169 (0,13 п.л. / 0,11 п.л.).

8. Неволин А.М. Совершенствование аэродинамики аппаратов воздушного охлаждения масла ГТУ. В кн.: Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Том 2. – Материалы VIII Международного симпозиума / А.М. Неволин, П.Н. Плотников. – М.: РАН, 2013. – С. 46-50 (0,31 п.л. / 0,28 п.л.).

9. Неволин А.М. Исследование теплоотдачи и гидравлического сопротивления трубы с турбулизатором. В кн.: Науки и технологии. Краткие сообщения XXXIII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. Том 1 / А.М. Неволин, П.Н. Плотников. – Миасс: МСНТ, 2013. – С. 133-135 (0,19 п.л. / 0,15 п.л.).

10. Неволин А.М. Повышение эффективности аппаратов воздушного охлаждения масла ГТУ ГПА за счет совершенствования их аэродинамики. В кн.: Теплофизика и энергетика: конференция с международным участием «VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике»: тезисы докладов / А.М. Неволин, П.Н. Плотников. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – С. 114 (0,06 п.л. / 0,05 п.л.).

11. Неволин А.М. Модернизация воздушного тракта аппарата воздушного охлаждения масла ГТУ. В кн.: Технические науки – от теории к практике. Сб. ст. по материалам XXXVIII междунар. науч.-практ. конф. № 9 (34) / А.М. Неволин, П.Н. Плотников. – Новосибирск: Изд. «СибАК», 2014. – С. 38-47 (0,94 п.л. / 0,85 п.л.).

Подписано в печать 01.04.2016 г.

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 1,0

Плоская печать

Тираж 100

Формат 60x84 1/16

Усл. печ. л. 1,4

Заказ 50
