

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА ИМЕНИ А. В. ЛЫКОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 621.565.93/.95 (043.3)

**Маршалова Галина Сергеевна**

**ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ  
С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Минск 2019

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

Научный руководитель	<b>Сухоцкий Альберт Борисович</b> , кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»
Официальные оппоненты:	<b>Акулич Петр Васильевич</b> , доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси»; <b>Конева Наталья Сергеевна</b> , кандидат технических наук, доцент кафедры энергофизики Белорусского государственного университета
Оппонирующая организация	<b>Белорусский национальный технический университет</b>

Защита состоится «15» октября 2019 в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.13.01 при Государственном научном учреждении «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси» по адресу 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15, корп. 3, конференц-зал.

Е-mail совета: [sovet@itmo.by](mailto:sovet@itmo.by).

Телефон ученого секретаря совета: (+375 17) 284-23-87; факс (+375 17) 292-25-13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси».

Автореферат разослан «10» сентября 2019 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 01.13.01  
кандидат физико-математических наук,  
доцент

Ю. В. Жукова

## ВВЕДЕНИЕ

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) являются эффективными промышленными теплообменниками, широко распространенными в химической, нефтехимической, целлюлозно-бумажной промышленности, энергетике, в системах воздушного отопления, на компрессорных станциях для охлаждения энергоносителей и конденсации отработавшего пара, на тепловых и атомных электростанциях для охлаждения рециркуляционной воды в воздушно-конденсационных установках, а также в качестве систем аварийного расхолаживания реакторов.

Согласно государственной программе «Энергосбережение», повышение конкурентоспособности экономики за счет увеличения энергоэффективности при внедрении энергосберегающих мероприятий является приоритетом развития Республики Беларусь на 2016–2020 гг. Некоторые из таких мероприятий могут быть направлены на интенсификацию режимов работы аппаратов воздушного охлаждения, эффективность эксплуатации которых в основном зависит от количества потребляемой электрической энергии на привод вентиляторов. При понижении температуры охлаждающего воздуха меньше некоторого значения вентиляторы АВО могут быть полностью отключены с обеспечением нормативной тепловой мощности аппарата. Достичь экономии энергии возможно, увеличив время эксплуатации АВО с частично или полностью выключенными вентиляторами, интенсифицировав теплообмен с помощью установки вытяжной шахты над трубным пучком. При этом АВО будет использоваться в режиме смешанной конвекции, когда вынужденный и свободный конвективный теплообмен играют равнозначную роль и никаким из этих процессов невозможно пренебречь. Также применение вытяжной шахты позволит исключить рециркуляцию воздуха в аппарате и повысить срок службы вентиляторов с приводами.

При эксплуатации АВО с вытяжной шахтой существует необходимость строгого соблюдения температурных режимов и точности их регулирования, что напрямую зависит от наличия достоверных данных по теплообмену оребренных пучков в режиме смешанной конвекции воздуха. Однако в настоящее время отсутствуют методики теплового расчета АВО в этом режиме, а существующие исследования смешанной конвекции воздуха не охватывают распространенные компоновочные параметры пучков, не учитывают влияние геометрических параметров вытяжной шахты и не предлагают рекомендаций по их выбору.

Таким образом, вышеизложенное обосновывает актуальность задачи по проведению теплового расчета и проектирования АВО с вытяжной шахтой.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами

Настоящая работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» в соответствии с утвержденным научно-техническим советом университета планом научно-исследовательской работы кафедры «Энергосбережения, гидравлики и теплотехники», в рамках заданий:

– Гранта, поддержанного Министерством образования Республики Беларусь, научно-исследовательская работа № ГБ 16-514 «Разработка энергосберегающего аппарата горизонтального исполнения для воздушного охлаждения природного газа» (2016 г., № г.р. 20163796 от 01.09.2016 г.);

– Государственной комплексной программы научных исследований «Энергетические системы, процессы и технологии» подпрограмма 1.2 «Эффективные теплофизические процессы и технологии» (задание 2.15 «Разработка эффективных теплообменных аппаратов систем теплонасосного теплоснабжения с учетом условий РБ» (2016–2018 гг., № г.р. 20161131 от 02.02.2016 г.);

– Хоздоговорной темы «Исследование тепловых и аэродинамических характеристик шестирядных пучков из оребренных труб различной компоновки» (заказ ООО «Предприятие» «ЦНО–Химмаш», 2017–2018 гг., № 29057-21 от 29.05.2017 г.);

– Темы, поддержанной Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, по договору с Государственным научным учреждением «Институт тепло- и массообмена имени Лыкова НАН Беларуси» №Т17РМ-081 «Экспериментальное и численное исследование теплопереноса теплоотдающих поверхностей с микро- и макрорельефом, в том числе нанесенных методом деформирующего резания» (2017–2019 гг. № г.р. 20171547 от 01.06.2017 г.);

– Темы, поддержанной Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, по договору с Государственным научным учреждением «Институт тепло- и массообмена имени Лыкова НАН Беларуси» №Т19РМ-076 «Интенсификация теплообменных процессов при вынужденной и смешанной конвекции в пучках оребренных труб в неоднородных средах» (2019–2021 гг. № г.р. 20191694 от 02.05.2019);

– Хоздоговорной темы «Результаты тепло-аэродинамических испытаний воздухоохлаждаемых теплообменных аппаратах» (заказ ООО «Бел Хуавэй Технолоджис», 2019 г., № SPC3071BLR1905308411201690428965 (ХД 19-456) от 03.06.2019 г.)

Тема диссертации отвечает приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь, утвержденным Постановлением Совета Министров

Республики Беларусь от 12.03.2015 г. №190 «О приоритетных направлениях научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг.» (1. Энергетика).

### **Цель и задачи исследования**

Цель исследования – разработка многопараметрической методики теплового расчета и рекомендаций по проектированию аппаратов воздушного охлаждения с позволяющей снизить электропотребление вытяжной шахтой.

Объект исследования – процессы переноса теплоты и импульса в шахматных пучках биметаллических оребренных труб в режиме смешанной конвекции.

Предмет исследования – закономерности теплообмена и аэродинамического сопротивления шахматных пучков биметаллических оребренных труб в режиме смешанной конвекции воздуха.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) разработать экспериментальную установку и методику исследования теплоотдачи и аэродинамического сопротивления шахматных пучков биметаллических оребренных труб в режиме смешанной конвекции;

2) провести экспериментальные исследования средней теплоотдачи в режимах свободной и смешанной конвекции одно- и многорядных шахматных пучков биметаллических оребренных труб, используемых в аппаратах воздушного охлаждения;

3) описать структуру течения воздуха в вытяжной шахте над шахматным пучком биметаллических оребренных труб и получить уравнения для расчета аэродинамического сопротивления и скорости воздуха в сжатом сечении пучка;

4) провести экспериментальные исследования влияния внешних воздушных потоков на теплоотдачу и аэродинамические характеристики пучка оребренных труб в режиме смешанной конвекции;

5) разработать рекомендации по проектированию аппаратов воздушного охлаждения на основе экспериментальных данных по влиянию геометрических параметров вытяжной шахты, поперечного шага установки труб и числа рядов на теплоотдачу и аэродинамическое сопротивление пучков в режиме смешанной конвекции;

6) качественно и количественно описать результаты экспериментальных исследований теплоотдачи и аэродинамического сопротивления шахматных пучков биметаллических оребренных труб, используемых в аппаратах воздушного охлаждения, в режиме смешанной конвекции с помощью обобщающих уравнений подобия;

7) разработать многопараметрическую методику теплового расчета аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой и провести сравнительную

оценку работы аппаратов в режимах вынужденной, свободной и смешанной конвекции.

### **Научная новизна**

Разработана экспериментальная установка для исследования теплоотдачи и аэродинамического сопротивления пучков труб, конструкция которой защищена двумя патентами на полезную модель, а также методика экспериментального исследования теплоотдачи пучков из оребренных труб.

Для режима смешанной конвекции получены закономерности влияния геометрических параметров вытяжной шахты на число Ричардсона, определен характер влияния поперечного шага установки труб на теплоотдачу однорядных пучков, изучено влияние числа рядов на теплоотдачу оребренных трубных пучков, что позволило разработать рекомендации по проектированию аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой.

Впервые выявлено негативное влияние гейзерных течений на теплоотдачу шахматных пучков оребренных труб АВО и предложено конструктивное решение в виде перегородок, устраняющее данный эффект.

Разработаны многофакторные критериальные уравнения расчета теплоотдачи и аэродинамического сопротивления трубных пучков, а также зависимости скорости воздуха в сжатом сечении пучка, в которых учтено негативное влияние внешних воздушных потоков.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика экспериментального исследования теплоотдачи и аэродинамического сопротивления, позволяющая получать закономерности их изменения для режима смешанной конвекции воздуха в пучках оребренных труб.

2. Результаты экспериментального исследования теплообмена и аэродинамических характеристик шахматных пучков из биметаллических труб с коэффициентом оребрения  $\varphi = 21$  в режиме смешанной конвекции воздуха, позволившие разработать новые многофакторные критериальные уравнения для определения коэффициента теплоотдачи с учетом аэродинамических и геометрических параметров пучка и вытяжной шахты.

3. Рекомендации по проектированию аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой, основанные на полученных закономерностях влияния геометрических параметров пучков и вытяжной шахты, гейзерных течений и внешних воздушных потоков на среднюю теплоотдачу и аэродинамические характеристики трубного пучка в режиме смешанной конвекции (установленные опти-

мальные диапазоны значений коэффициента сужения площади сечения вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка  $0,5 < \chi_{ш} < 1$  и относительной высоты шахты  $500 < H / d_3 < 1500$ ).

4. Многофакторные критериальные уравнения для определения коэффициента теплоотдачи при охлаждении в режиме смешанной конвекции одно- и многорядных пучков биметаллических труб с коэффициентом оребрения  $\varphi = 21$  с учетом аэродинамических и геометрических параметров вытяжной шахты.

5. Многопараметрическая методика теплового расчета аппаратов воздушного охлаждения с позволяющей снизить электропотребление вытяжной шахтой. Показано, что в зависимости от климатических условий при эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения в режиме смешанной конвекции экономия электрической энергии может составить до 30–50% по сравнению с режимом вынужденной конвекции.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Основные научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, получены автором лично или при его непосредственном участии.

Постановка теоретических и экспериментальных задач осуществлялась соискателем совместно с научным руководителем. Соавторы совместных публикаций Фарафонов В. Н., Дударев В. В. и Филатов С. О. оказывали помощь при тарировке экспериментальной установки.

Оребренные трубы были предоставлены ООО «Грибановский машиностроительный завод».

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты исследований и положения работы докладывались и обсуждались на 66-ой и 67-ой научно-технических конф. студентов и магистрантов (Минск, Беларусь, 20–25 апреля 2015 г., 18-23 апреля 2016 г.); на Четвертой всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (Казань, Республика Татарстан, РФ, 16–18 декабря 2015 г.); на Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс» (Губкин, Россия, 14 апреля 2016 г.); на Девятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России, 2016» (Москва, Россия, 5–8 октября 2016 г.); на научно-практической конференции «Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана» (Минск, Беларусь, 13 октября 2016 г.); на

III Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты – 2016» (Минск, Беларусь, 29–30 ноября 2016 г.); на VI Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды» (Украина, г. Харьков 22–23 марта 2017 г.); на XII Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Наука и образование – 2017» (Астана, Россия 14 апреля 2017 г.); на Ломоносовских научных чтениях студентов, аспирантов и молодых ученых – 2017 (Архангельск, Россия, 2017 г.); на Международной молодёжной научной конференции «XXIII Туполевские чтения» (Казань, Россия, 8–10 ноября 2017 г.); на 81-й и 82-й науч.-техн. конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием) (Минск, Беларусь, 1–12 февраля 2017 г. и 1–14 февраля 2018 г.); на Седьмой российской национальной конференции по теплообмену (Москва, Россия, 22–26 октября 2018 г.).

Результаты диссертационного исследования, полученные при выполнении совместных российско-белорусских проектов № Т17 РМ-081 и № Т19 РМ-076, использованы при выполнении договора с АО НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа, что подтверждается актами практического использования. Результаты диссертационного исследования использованы для выполнения теплотехнических расчетов интенсивных конструкций охладителей электронных устройств для ООО «БЕЛ ХУАВЭЙ ТЕХНОЛОДЖИС», что подтверждается справкой о практическом использовании. Также результаты диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс по дисциплине «Производство, транспорт и потребление тепловой энергии» специальности «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» УО «Белорусский государственный технологический университет».

### **Опубликование результатов диссертации**

Результаты работы опубликованы в 9 статьях в рецензируемых научных изданиях из перечня изданий ВАК РБ (объем – 5,4 авторских листа), в 12 статьях в сборниках трудов и материалов научных конференций, в сборниках тезисов докладов международных и республиканских конференций (2), в 2 патентах на полезную модель, в 1 патенте на изобретение, и 1 заявке на патент на полезную модель.

Общее количество научных публикаций – 27, общий объем опубликованного материала – 8,3 авторских листа.



## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и трех приложений. Полный объем диссертации – 153 стр.; общее количество рисунков – 46, таблиц – 5, использованных источников – 118 (на 10 стр.).

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, дан краткий анализ изучаемой проблемы, определены основные направления исследований.

В **первой главе** выполнен обзор конструкций аппаратов воздушного охлаждения и компоновочных параметров трубных пучков теплообменных секций.

Значительный системный вклад в исследования теплоотдачи в режиме свободной конвекции оребренных труб и пучков из них в неограниченном пространстве воздуха внесли В. Б. Кунтыш, А. В. Самородов, Е. Н. Письменный, А. В. Позднякова, А. Н. Бессонный, А. В. Волков, А. Э. Пиир, С. П. Рошин, О. Г. Мартыненко, Ю. А. Соковишин и другие.

Экспериментальным и численным исследованиям теплоотдачи в режиме смешанной конвекции одиночных труб и трубных пучков посвящены работы В. Б. Кунтыша, О. О. Мильмана, Ю. Н. Васильева, Г. А. Марголина, А. Кумара, Е. Н. Письменного, А. М. Тереха, О. Г. Мартыненко, Ю. А. Соковишина и других, которые говорят об эффективности применения данного режима.

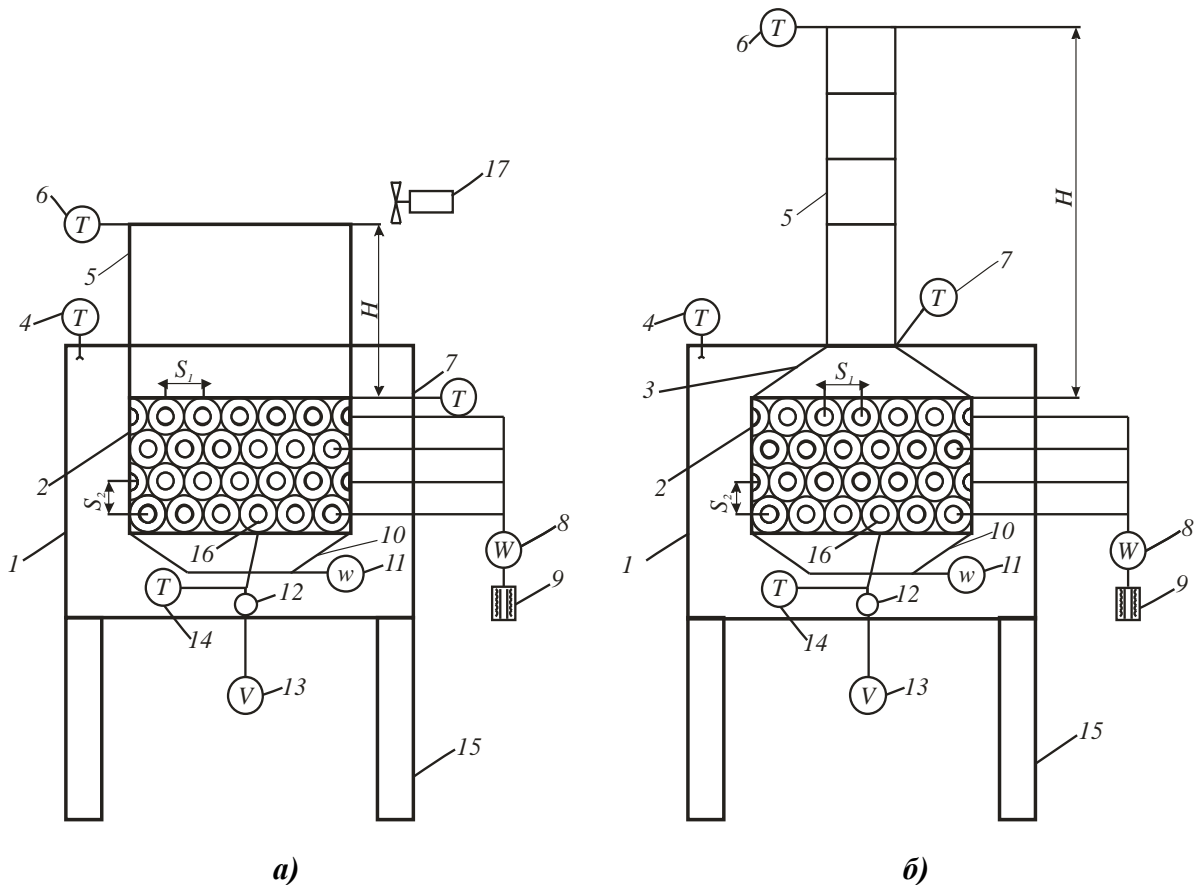
Однако, несмотря на теоретическую и методическую ценность их исследований, использовать имеющийся банк данных для проведения теплового расчета аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой не представляется возможным, в виду отличия конструктивных особенностей и режимов течений воздуха.

На основании рассмотрения отечественной и зарубежной литературы были обоснован выбор направлений исследования, сформулирована цель работы, поставлены задачи исследования, изложена концепция работы.

Во **второй главе** представлено описание экспериментальной установки (рисунк 1) и методики исследования теплоотдачи пучков из оребренных труб в режиме смешанной конвекции.

Установка состояла из камеры 1, расположенной на опорах 15, замкнутой по периметру и открытой сверху и снизу для свободного течения воздуха. Температура воздуха измерялась лабораторным термометром 4. В центре камеры размещался опытный горизонтальный пучок 2 из обогреваемых переменным электрическим током труб, при этом одна из центральных обогреваемых труб

(калориметр) в каждом ряду пучка содержала средства измерения средней температуры для вычисления приведенного коэффициента теплоотдачи.



**1** – камера, **2** – оребренный пучок, **3** – конфузор, **4** – лабораторный термометр, **5** – вытяжная шахта, **6, 7** – термопарные сетки, **8** – ваттметры, **9** – трансформатор, **10** – диффузор, **11** – термоанемометр, **12** – переключатель; **13** – вольтметр, **14** – сосуд Дьюара, **15** – опоры, **16** – хромель-алюмелевые термопары, **17** – вентилятор  
**Рисунок 1.** – Схема экспериментальной установки с вытяжной шахтой  
**а)** прямоугольного основания и **б)** с цилиндрической трубой

Экспериментальные исследования проводились на стандартных промышленных биметаллических оребренных трубах со следующими параметрами: диаметр  $d = 0,0568$  м; диаметр трубы по основанию  $d_0 = 0,0264$  м; высота, шаг, средняя толщина ребра соответственно  $h = 0,0152$  м;  $s = 0,00243$  м;  $\Delta = 0,00055$  м; теплоотдающая длина оребрения трубы  $l = 0,3$  м; общая длина оребренной трубы  $l = 0,33$  м; коэффициент оребрения трубы составил  $\phi = 21$ . На торцах труб были установлены фторопластовые втулки для предотвращения тепловых потерь.

Теплоэлектронагревательные элементы труб подключались параллельно к регулируемому масляному трансформатору **9**. Температура на поверхности трубы-калориметра фиксировалась с помощью пяти термопар **16**, которые через

переключатель 12 подключались к вольтметру 13. Мощность, подводимая к каждой трубе-калориметру, измерялась ваттметром 8. Общий для всех термопар холодный спай помещался в сосуд Дьюара 14 с тающим льдом.

Для организации режима смешанной конвекции воздуха над экспериментальным пучком устанавливалась вытяжная шахта 5 различных видов: прямоугольного основания с крышками различных диаметров  $d_{\text{отв}} = 0,09; 0,105; 0,137; 0,160; 0,187; 0,205$  м (рисунок 1 а) и с конфузуром 3, переходящим в цилиндрическую трубу (рисунок 1 б), диаметром 0,105 м, высотой  $H = 0,52; 1,16; 1,48; 2,10$  м.

Для исследования влияния внешних воздушных потоков на теплоотдачу и аэродинамическое сопротивление трубных пучков над шахтой устанавливался вентилятор 17.

Скорость воздуха на входе в диффузор 10 и на выходе из вытяжной шахты измерялась термоанемометром 11. Для контроля температуры на входе и выходе в вытяжной шахте располагались термопарные сетки 6, 7.

Экспериментальные исследования проводились в условиях полного теплового моделирования с обогревом всех труб при наращивании подводимой мощности от одной экспериментальной точки к другой. Установка калориметров в каждом ряду пучка позволила в стационарном тепловом режиме получить одновременно необходимые первичные данные для определения средней теплоотдачи как любого ряда в отдельности, так и в целом для пучка.

По результатам экспериментальных исследований вычислялся средний приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, отнесенный к полной наружной поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>К)

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(t_{\text{ст}} - t_0) \cdot F}, \quad (1)$$

где  $Q_k$  – конвективный тепловой поток, Вт;

$t_{\text{ст}}$  – средняя температура поверхности стенки у основания ребер трубы, °С;

$t_0$  – температура воздуха в камере, °С;

$F = l \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \varphi$  – площадь теплоотдающей оребренной поверхности трубы, м<sup>2</sup>;

$\varphi$  – коэффициент оребрения трубы

$$\varphi = 1 + \frac{2h}{s d_0} (d_0 + h + \Delta). \quad (2)$$

Тепловой поток  $Q_k$ , Вт, отведенный от одной трубы к воздуху конвекцией, рассчитывался по формуле

$$Q_k = W - Q_l - Q_{\text{п}}, \quad (3)$$

где  $W$  – электрическая мощность, подводимая к калориметру, Вт;

$Q_l$  – тепловой поток, отведенный излучением от трубы к воздуху, Вт;

$Q_{\text{п}}$  – тепловые потери через торцы труб и токоподводы, Вт.

Расчет теплового потока излучением от калориметра проводились зональным способом\*. Торцевые тепловые потери калориметра  $Q_{\text{п}}$  определялись по результатам предварительных опытов на теплоизолированной трубе.

Результаты экспериментов обрабатывались и представлялись в числах подобия Нуссельта  $Nu = \alpha_k \cdot d_0 / \lambda$ ; Грасгофа  $Gr = \beta \cdot g \cdot d_0^3 (t_{\text{ст}} - t_0) / \nu^2$ , Рейнольдса  $Re = w \cdot d_0 / \lambda$ ; Ричардсона  $Ri = Gr / Re^2$ . В качестве определяющей температуры для расчета теплофизических свойств принималась температура окружающего воздуха  $t_0$ .

Среднее значение  $\alpha_k$  всего пучка для заданного теплового режима определяли по формуле (1), где значение  $t_{\text{ст}}$  – среднее арифметическое по показаниям термопар для всех калориметров пучка, значения  $Q_k$  и  $F$  равны соответственно суммарным значениям этих величин всех калориметров.

Погрешности значений  $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Re$ ,  $w$  во всем диапазоне тепловой нагрузки не превышали 7,4; 7,4; 7,08; 7,06% соответственно.

Правильность и надежность разработанной экспериментальной установки, принятой методики расчета и обработки результатов экспериментальных данных проверялась в тарировочных опытах, в которых исследовалась закопченная гладкая цилиндрическая труба со степенью черноты равной 0,95. Результаты измерений сравнивались с обобщенным критериальным уравнением М.А. Михеева для гладкого одиночного горизонтального цилиндра в условиях свободной конвекции в неограниченном объеме. Расхождением результатов не превысило 3%.

Далее проводился эксперимент по исследованию свободной конвекции оребренной трубы с приведенными степенями черноты равными 0,65 и 0,99, по результатам которого получено согласование зависимостей чисел Нуссельта от чисел Релея с расхождением менее 5%.

Проведенные тарировочные опыты показали, что экспериментальная установка и ее аппаратное оснащение, конструкция трубы-калориметра, а также принятая методика проведения эксперимента и обработки данных обеспечивают требуемую точность, надежность и достоверность исследования теплоотдачи пучков труб в условиях свободной и смешанной конвекции.

---

\* Самородов, А.В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / А.В. Самородов. - Архангельск, 1999. – 176 с.

В третьей главе изложены результаты экспериментального исследования средней теплоотдачи оребренных трубных пучков в режимах свободной и смешанной конвекции применительно к аппаратам воздушного охлаждения.

Проведены экспериментальные исследования теплоотдачи в режимах свободной и смешанной конвекции для однорядных оребренных пучков с поперечными шагами  $S_1 = 0,058, 0,061, 0,064$  и  $0,070$  м, которым соответствовали следующие относительные поперечные шаги –  $\sigma_1 = S_1 / d = 1,036; 1,089; 1,14; 1,25$ .

Экспериментальные данные каждой серии по средней теплоотдаче в режиме свободной конвекции с отклонением, не превышающим  $\pm 5\%$ , аппроксимированы уравнением вида

$$Nu = K_1 \cdot Gr^m [1 - \exp(-K_2 / Gr)], \quad (4)$$

где  $K_1, K_2, m$  – коэффициенты, зависящие от компоновочных характеристик пучка (таблица 1).

Таблица 1. – Значения постоянных  $K_1, K_2$  и  $m$  по формуле (4) и  $C_1, C_2, C_3$  и  $n$  по формуле (5) для средней теплоотдачи однорядных пучков в режимах свободной и смешанной конвекции

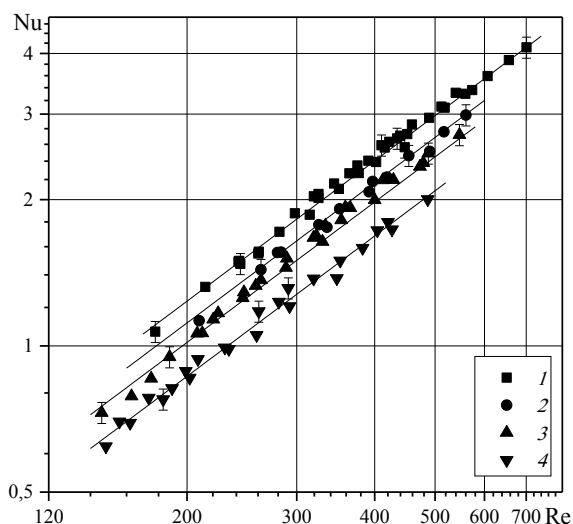
$S_1, \text{ м}$	$\sigma_1$	$K_1$	$K_2$	$m$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$n$
0,058	1,036	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^5$	0,48	0,0144	1,3	0,0008	0,48
0,061	1,089	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$10,43 \cdot 10^5$	0,45	0,0086	1,4	0,00153	0,48
0,064	1,14	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$9,14 \cdot 10^5$	0,44	0,0059	1,46	0,0022	0,48
0,070	1,25	$6,76 \cdot 10^{-3}$	$10,85 \cdot 10^5$	0,43	0,00358	1,51	0,00307	0,48

Для однорядного оребренного пучка с различными поперечными шагами установки труб при  $d_{\text{отв}} = \text{const} = 0,105$  м изучено влияние изменения высоты вытяжной шахты на теплоотдачу в режиме смешанной конвекции и проведено сравнение полученных результатов со свободно-конвективным режимом.

Экспериментальные данные по теплоотдаче однорядного оребренного пучка в режиме смешанной конвекции с погрешностью, не превышающей 5%, обобщены уравнением вида

$$Nu = C_1 \left( C_2 - \exp\left(-C_3 \frac{H}{d_3}\right) \right) \cdot Gr^n, \quad (5)$$

где  $n, C_1, C_2, C_3$  – коэффициенты, зависящие от геометрических параметров вытяжной шахты и компоновочных параметров трубного пучка (таблица 1).



1 –  $\sigma_1 = 1,036$ ; 2 –  $\sigma_1 = 1,089$ ; 3 –  $\sigma_1 = 1,14$ ; 4 –  
 $\sigma_1 = 1,25$

**Рисунок 2.** – Теплоотдача однорядного горизонтального пучка при различных поперечных шагах установки труб

нением вида

$$Nu = 0,00129 \cdot \left( \frac{d_0}{d_3} \right)^{0,9} Re^{0,96}, \quad (6)$$

которое действительно в интервале изменения  $Re = 130-720$ ,  $d_0/d_3 = 4,85-7,21$ .

Исследование теплоотдачи многорядных пучков в режимах свободной и смешанной конвекции проведено для равносторонней шахматной компоновки с поперечным шагом установки труб  $S_1 = 0,058$  м ( $\sigma_1 = 1,036$ ), продольным шагом  $S_2 = 0,0505$  м ( $\sigma_2 = 0,9$ ).

Экспериментальные данные каждой серии по изучению средней теплоотдачи горизонтально расположенных шахматных равносторонних пучков с числом рядов  $z = 1, 2, 3, 4$  в режиме свободной конвекции с отклонением, не превышающим  $\pm 5\%$ , аппроксимированы уравнением (4), для которого в таблице 2 приведены значения постоянных  $K_1$ ,  $K_2$  и  $m$ .

Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче в режиме смешанной конвекции для одно-, двух-, трех- и четырехрядных пучков проведено с отклонением, не превышающим  $\pm 5\%$ , по уравнению вида

$$Nu = A \cdot Gr^n, \quad (7)$$

По результатам экспериментальных исследований установлено, что в режиме смешанной конвекции с увеличением поперечного шага установки труб теплоотдача пучка снижается, а в режиме свободной конвекции наибольшей теплоотдачей обладает пучок с  $\sigma_1 = 1,14$ .

Экспериментальные данные по теплоотдаче однорядных горизонтальных пучков в режиме смешанной конвекции при различных поперечных шагах установки труб (рисунок 2) с отклонением, не превышающим 5%, также обобщены уравнением

$$A = A_1 \cdot (1,1 - \exp(-A_2 \cdot \chi_{ш})) \left( 1,3 - \exp\left(-A_3 \cdot \frac{H}{d_3}\right) \right), \quad (8)$$

где  $n$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  – коэффициенты, зависящие от геометрических параметров вытяжной шахты и компоновочных параметров пучка (таблица 2);

$\chi_{ш} = f_{отв} / f_{сж}$  – коэффициент сужения площади сечения вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка,

$f_{отв} = \pi \cdot d_{отв}^2 / 4$  – площадь выходного отверстия вытяжной шахты, м<sup>2</sup>;

$f_{сж}$  – площадь сжатого сечения пучка, м<sup>2</sup>;

$d_3$  – эквивалентный диаметр сжатого поперечного сечения пучка, м:

$$d_3 = \frac{2s}{2h + s} S_1 \cdot \chi, \quad (9)$$

где  $\chi$  – коэффициент загромождения оребренными трубами поперечного сечения пучка для прохода воздуха

$$\chi = 1 - \frac{1}{S_1} \left( d_0 + 2 \frac{h \cdot \Delta}{s} \right). \quad (10)$$

Уравнения (7) и (8) действительны в интервалах  $Gr = 24\,000\text{--}330\,000$ ,  $H/d_3 = 142\text{--}580$ ,  $\chi_{ш} = 0,14\text{--}0,75$ .

Таблица 2. – Значения постоянных  $K_1$ ,  $K_2$  и  $m$  по (4) и  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $n$ ,  $B$  по (7), (8) и (11) для средней теплоотдачи пучков в режимах свободной и смешанной конвекции

$z$	$K_1$	$K_2$	$m$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$n$	$B$
1	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^5$	0,48	0,0378	1,69	0,0008	0,48	0,00770
2	$2,25 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^5$	0,48	0,0185	2,77	0,00126	0,48	0,00523
3	$1,95 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^5$	0,48	0,0105	3,65	0,00164	0,48	0,00397
4	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$6,1 \cdot 10^5$	0,48	0,0061	4,68	0,00210	0,48	0,00302

Выявлено, что применение режима смешанной конвекции по сравнению со свободно-конвективным позволяет увеличить теплоотдачу в 1,29–4,1 раза – для однорядного пучка, в 1,5–3,7 раза – для двухрядного, в 1,3–2,8 раза – для трехрядного, в 1,25–2,75 раза – для четырехрядного. При этом для режима свободной конвекции в диапазоне чисел Грасгофа  $200\,000 < Gr < 400\,000$  наблюдалось снижение интенсивности роста теплоотдачи при увеличении мощности, подаваемой на пучок, а при  $Gr \geq 400\,000$  дальнейшее повышение мощности не оказывало

влияния на теплоотдачу пучка. Для смешанно-конвективного режима в изученном диапазоне чисел Грасгофа  $Gr < 330\,000$  не наблюдалось снижение интенсивности увеличения теплоотдачи.

В процессе обработки экспериментальных данных было установлено, что зависимости  $Nu = f(Re)$  идентичны при различных параметрах вытяжной шахты, а определяются только параметрами трубного пучка. Экспериментальные данные по теплоотдаче в режиме смешанной конвекции с погрешностью, не превышающей 5%, были аппроксимированы уравнением вида

$$Nu = B \cdot Re^{0.96}, \quad (11)$$

где  $B$  – коэффициент, зависящий от параметров трубного пучка (таблица 2).

Уравнение (11) действительно в интервале изменения  $Re = 130–760$ .

При проведении экспериментальных исследований при равенстве площади выходного отверстия шахты площади пучка  $f_{отв} = 0,1044 \text{ м}^2$  зафиксировано значительное снижение теплоотдачи для многорядных пучков. В сравнении с теоретическими данными по уравнению (7) для  $f_{отв} = 0,1044 \text{ м}^2$  экспериментально измеренная теплоотдача снизилась в 1,7–2 раза (рисунок 3). Это связано с тем, что на структуру течения существенное влияние оказывал перепад давления воздуха на входе и выходе из пучка. При свободной конвекции перепад давления равен нулю, поскольку на входе и выходе из пучка атмосферное давление. При установке вытяжной шахты над пучком общее гравитационное давление воздуха в пучке и в шахте равно их общему аэродинамическому сопротивлению

$$\Delta p_{п}^{гр} + \Delta p_{ш}^{гр} = \Delta p_{п}^{соп} + \Delta p_{ш}^{соп}, \quad (12)$$

где  $\Delta p_{п}^{гр}$ ,  $\Delta p_{ш}^{гр}$  – гравитационное давление воздуха в пучке и в шахте;

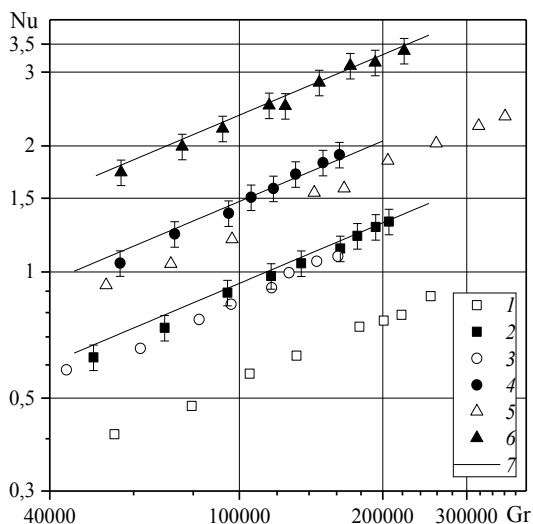
$\Delta p_{п}^{соп}$ ,  $\Delta p_{ш}^{соп}$  – аэродинамическое сопротивление пучка и шахты.

Так как многорядный оребренный пучок имел большое аэродинамическое сопротивление, то он препятствовал поступлению окружающего воздуха снизу в пучок и удалению нагретого воздуха из шахты. В результате создавались условия неустойчивого равновесия движущегося столба нагретого воздуха с наличием вакуумного разряжения над пучком.

В некоторый момент условие неустойчивого равновесия нарушалось, и под действием разряжения происходил подсос снаружи холодного плотного воздуха в шахту через край его боковой стенки. Причем с той стороны, где произошел подсос холодного воздуха, движение воздуха в пучке замедлялось, оребренные трубы перегревались, а с противоположной стороны пучка движение воздуха



ускорялось, при этом трубы пучка интенсивно охлаждались. После того как холодный и нагретый воздух в шахте перемешивались, давление по высоте шахты выравнивалось, потоки стабилизировались. Затем воздух в шахте заново прогревался и процессы нарушения структуры потока воздуха повторялись вновь. Описанное нестабильное движение воздуха названо *гейзерное течение воздуха*.



**1, 3, 5 – четырех-, трех-, двухрядные пучки соответственно с шахтой без установки перегородок; 2, 4, 6 – четырех-, трех-, двухрядные пучки соответственно с шахтой при установке перегородок, 7 – по уравнению (7) для  $f_{отв} = 0,1044 \text{ м}^2$**

**Рисунок 3. – Влияние гейзерных течений на теплоотдачу пучков труб**

потока воздуха, нагретого в нижележащих рядах. Однако при  $z \geq 6$  дальнейшее повышение числа рядов не окажет существенного влияния на теплоотдачу пучка, так как растущее сопротивление движению воздуха и перегрев компенсируется ростом подъемной силы за счет добавления рядов.

В четвертой главе выполнен анализ и обобщение полученных экспериментальных данных по теплоотдаче оребренных трубных пучков в режиме смешанной конвекции.

Для обобщения экспериментальных данных для одно- и многорядных пучков в режиме смешанной конвекции воздуха на рисунке 4 а представлена зависимость вида  $Nu / A = f(Gr)$ , где коэффициент  $A$  для исследованных пучков рассчитывался по формуле (8).

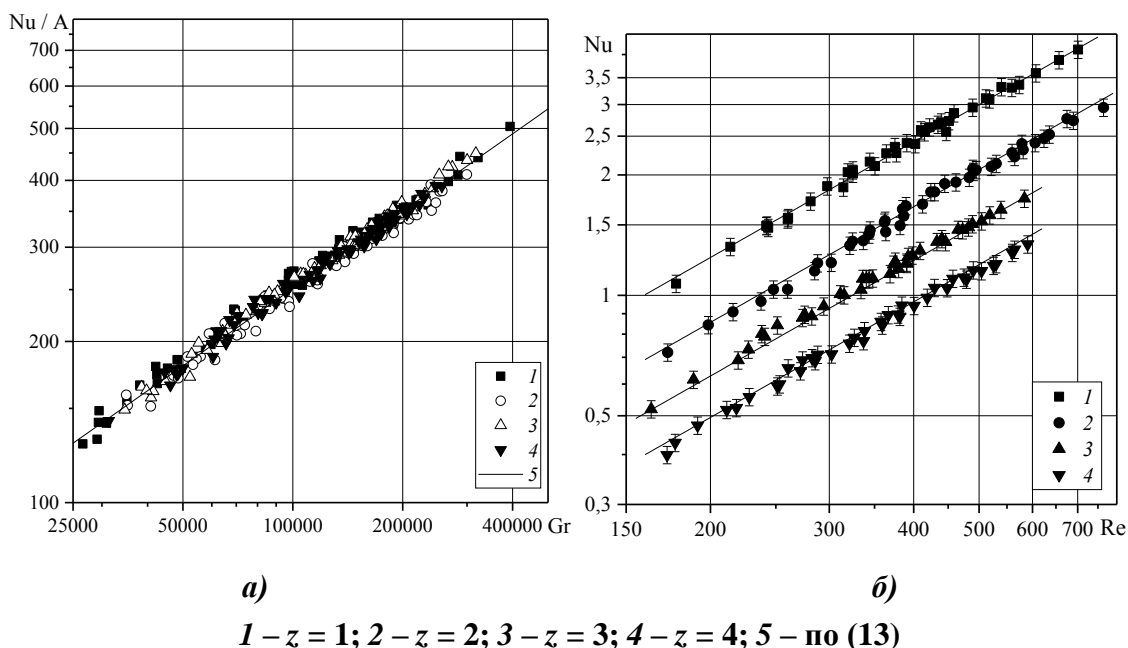
Для расчета средней теплоотдачи одно- и многорядных пучков труб с равносторонней компоновкой ( $\sigma_1 = 1,036$ ,  $\sigma_2 = 0,9$ ) в режиме смешанной конвекции получено обобщенное критериальное уравнение с рассеиванием точек  $\pm 5\%$

Для компенсации негативного влияния гейзерных течений на теплоотдачу многорядных оребренных пучков предложена установка перегородок, позволивших стабилизировать процессы обтекания пучка, увеличить теплоотдачу многорядных пучков в 1,6–2 раза и достичь значений в соответствии с теоретическими данными по (7) с отклонением, не превышающим 7% (рисунок 3).

Проведено исследование влияния количества рядов на теплоотдачу в режиме смешанной конвекции и получено, что с их увеличением теплоотдача пучка снижается, что объясняется ростом аэродинамического сопротивления пучка, а также воздействием температуры

$$\begin{aligned} \text{Nu} = & (0,00313 + 0,07693 \cdot 0,45^z) \cdot (1,1 - \exp(-1,69 \cdot z^{0,72} \cdot \chi_{\text{ш}})) \times \\ & \times (1,3 - \exp(-7,65 \cdot 10^{-4} \cdot z^{0,72} \cdot H / d_3)) \cdot \text{Gr}^{0,48}, \end{aligned} \quad (13)$$

которое действительно в интервале изменения  $\text{Gr} = 26\,000\text{--}400\,000$ ,  $H/d_3 = 142\text{--}580$ ,  $\chi_{\text{ш}} = 0,14\text{--}0,75$ .



**Рисунок 4.** – Теплоотдача оребренных трубных пучков в режиме смешанной конвекции

На рисунке 4 б обобщение экспериментальных данных по средней теплоотдаче исследованных пучков труб в режиме смешанной конвекции проводилось в виде  $\text{Nu} = f(\text{Re}, z)$ , в результате которого с рассеиванием опытных точек  $\pm 5\%$  получено критериальное уравнение вида

$$\text{Nu} = (0,00189 + 0,00988 \cdot 0,5866^z) \cdot \text{Re}^{0,96}, \quad (14)$$

которое действительно в интервале изменения  $\text{Re} = 130\text{--}760$ .

Однако уравнение (12) неудобно использовать для инженерных расчетов, так как число  $\text{Re}$  выражается через трудноопределимый параметр – скорость воздуха в сжатом сечении пучка  $w$ . Поэтому на основании условия аэродинамического баланса движения потока воздуха в шахте (зависимость (12)) для определения скорости разработана методика расчета и получена следующая формула

$$w = \chi_{\text{ш}} \frac{\rho_{\text{ш}}}{\rho_{\text{п}}} \sqrt{\frac{H \cdot g \cdot \theta}{\text{Eu}_{\text{ш}} + \text{Eu}_{\text{п}} \chi_{\text{ш}}^2 - \frac{\Psi}{2} \theta}}, \quad (15)$$

где  $\theta = \frac{\rho_0 - \rho_{\text{ш}}}{\rho_{\text{ш}}}$  – относительная разность плотностей;

$\psi = 3,74 - 2,44 \cdot \chi_{\text{кр}}$  – коэффициент образования области нагретого воздуха над шахтой;

$\text{Eu}_{\text{ш}} = \text{Eu}_{\text{тр}} + \text{Eu}_{\text{сж}} + \text{Eu}_{\text{рас}}$  – число Эйлера для теплообменного пучка и вытяжной шахты, состоящее из аэродинамического сопротивления шахты, обусловленного сжатием, трением и расширением потока воздуха в канале шахты;

$\text{Eu}_{\text{п}}$  – число Эйлера для одно- и многорядных пучков.

Для расчета аэродинамического сопротивления оребренных пучков в режиме смешанной конвекции воздуха с погрешностью, не превышающей 7%, получено критериальное уравнение вида

$$\text{Eu}_{\text{п}} = 191,12 \cdot \text{Re}^{-0,395} [0,653 - \exp(-0,459 \cdot z)]. \quad (16)$$

Проведены экспериментальные исследования влияния внешних горизонтальных воздушных потоков над вытяжной шахтой, в результате которых установлено, что их присутствие снижает теплоотдачу в 1,2–1,7 раза, скорость воздуха в пучке – на 12–15%.

Установлено, что число Ричардсона не зависит от подаваемой тепловой мощности, а только от геометрических параметров пучка и вытяжной шахты, что позволило определить оптимальные диапазоны значений коэффициента сужения площади сечения вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка  $0,5 < \chi_{\text{ш}} < 1$  и относительной высоты шахты  $500 < H / d_{\text{с}} < 1500$  для проектирования АВО. Также найдены минимальные числа Ричардсона для однорядного пучка  $\text{Ri}_{\text{min}} = 0,0173$ , для двухрядного  $\text{Ri}_{\text{min}} = 0,0342$ , для трехрядного  $\text{Ri}_{\text{min}} = 0,0625$ , для четырехрядного  $\text{Ri}_{\text{min}} = 0,11$ .

В **пятой главе** представлена методика расчета аппарата воздушного охлаждения с вытяжной шахтой, где искомой величиной является температура наружного воздуха, при которой обеспечивается охлаждение продукта до определенной температуры. На основании данной методики проведен расчет двухсекционного четырехрядного двухвентиляторного АВО для охлаждения газа, теплообменная секция которого состоит из биметаллических труб с накатными алюминиевыми ребрами с поперечным шагом установки труб –  $S_1 = 0,058$  м, продольным шагом –  $S_2 = 0,0505$  м, в режиме смешанной конвекции, организованном с помощью установки вытяжной шахты, в результате которого получено,

что для расчетной тепловой нагрузки  $Q = 1680000$  Вт, температура окружающей среды, при которой возможно использовать АВО с одним выключенным вентилятором, составляет  $13,4^{\circ}\text{C}$ , что на  $4,4^{\circ}\text{C}$  больше, чем для такого аппарата, работающего в режиме свободной конвекции. Расчетная экономия электрической энергии на один аппарат в режиме смешанной конвекции составила 9,1 т у.т. по сравнению со свободно-конвективным и 58,4 т у.т. по сравнению с режимом вынужденной конвекции.

Таким образом, в зависимости от климатических условий при эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения в режиме смешанной конвекции экономия электрической энергии может составить до 30–50% по сравнению с режимом вынужденной конвекции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Для получения новых экспериментальных данных о теплообмене при смешанной конвекции в оребренных пучках труб аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой спроектирована и разработана экспериментальная установка [24, 25], а также методика экспериментального исследования теплоотдачи и аэродинамического сопротивления пучков биметаллических оребренных труб [1, 2, 6, 10, 11, 14].

2. Для режима смешанной конвекции выполнены экспериментальные исследования средней теплоотдачи биметаллических труб с коэффициентом оребрения  $\phi = 21$ , собранных в шахматные равносторонние пучки с поперечным шагом  $S_1 = 0,058$  м, продольным шагом  $S_2 = 0,0505$  м и числом поперечных рядов  $z = 2-4$  [19, 20], а также в однорядные пучки с поперечными шагами  $S_1 = 0,058, 0,061, 0,064$  и  $0,070$  м [2, 3, 4, 5, 16, 18, 21, 23].

3. Впервые для режима смешанной конвекции в оребренных пучках АВО выявлено влияние на теплоотдачу гейзерных течений [7, 9], которые снижают ее в 1,6–2 раза, а также предложено конструктивное решение в виде перегородок, компенсирующее данный негативный эффект [27].

4. Изучена структура течения воздуха в пучке и вытяжной шахте [5, 7, 9] и получены расчетные зависимости для определения скорости воздуха и аэродинамического сопротивления оребренных пучков в режиме смешанной конвекции [2, 4], в которых учтено негативное влияние внешних воздушных потоков, снижающее аэродинамическое сопротивление на 12–15%, теплоотдачу – в 1,1–2 раза.

5. Для проектирования АВО с вытяжной шахтой получены закономерности влияния поперечного шага установки труб на среднюю теплоотдачу в режиме

смешанной конвекции для однорядного трубного пучка, согласно которым с его увеличением теплоотдача в пучке снижается [3, 8, 21]. Также установлены закономерности влияния числа рядов  $z$  на среднюю теплоотдачу пучка, согласно которым с увеличением числа рядов до 5 теплоотдача пучка снижается в 1,2–2,3 раза, что объясняется увеличением аэродинамического сопротивления пучка, а также воздействием температуры потока воздуха, нагретого в нижележащих рядах. Однако при  $z \geq 6$ , дальнейший рост числа рядов не оказывает существенное влияние на изменение теплоотдачи в режиме смешанной конвекции. Установлено, что число Ричардсона не зависит от подаваемой тепловой мощности [4], а только от геометрических параметров пучка и вытяжной шахты, что позволило определить оптимальные диапазоны значений коэффициента сужения площади сечения вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка  $0,5 < \chi_{ш} < 1$  и относительной высоты шахты  $500 < H / d_3 < 1500$ .

б. Для смешанно-конвективного режима течения воздуха разработаны многофакторные критериальные уравнения расчета средней теплоотдачи в виде  $Nu = f(Gr, H/d_3, \chi_{ш})$ ,  $Nu = f(Re)$  [4, 8, 18, 20] и обобщенные критериальные уравнения вида  $Nu = f(Gr, H / d_3, \chi_{ш}, z)$  и  $Nu = f(Re, z)$ . На их основе разработана многопараметрическая методика теплового расчета теплообменников с воздушным охлаждением для режима смешанной конвекции [8]. С помощью данной методики, а также с учетом рекомендаций по проектированию АВО с вытяжной шахтой, рассчитана энергетическая и экономическая эффективность применения смешанной конвекции. По сравнению с режимом вынужденной конвекции получена экономия энергии до 58,4 т у.т. / год, с режимом свободной конвекции – до 9,1 т у.т. / год на работу одного АВО.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанная экспериментальная установка [24, 25] и методика проведения экспериментального исследования могут быть использованы в лабораториях научно-исследовательских институтов и университетов для дальнейшего изучения теплоотдачи в режиме смешанной конвекции.

Полученные критериальные зависимости для расчета теплоотдачи ребренных пучков в режиме смешанной конвекции могут быть использованы проектно-конструкторскими институтами нефтехимического и газового машиностроения, лесной промышленности для проектирования экономичных воздухоохлаждаемых теплообменников.

Разработанная методика расчета аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой, а также рекомендации на их проектирование предлагаются использовать заводам-изготовителям теплообменного оборудования при проектировании и изготовлении АВО, а также нефтеперерабатывающими, химическими,

нефтехимическими предприятиями, компрессорными станциями, целлюлозно-бумажной промышленностью, на атомных и тепловых электростанциях для модернизации существующих аппаратов.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Разработка стенда и исследование свободной конвекции одиночной трубы при различных углах наклона / А. Б. Сухоцкий, В. Н. Фарафонов, В. В. Дударев, С. О. Филатов, Г. С. Сидорик (Маршалова) // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесн. хоз-во, природопольз. и перераб. возоб. рес. – 2017. – № 1. – С. 169–174.

2. Сухоцкий, А. Б. Интенсификация свободной конвекции в однорядном оребренном пучке в аппаратах воздушного охлаждения / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // Труды БГТУ. Серия 2. Хим. технол., биотехн., геоэколог. – 2017. – № 1. – С. 68–74.

3. Сухоцкий, А. Б. Повышение энергоэффективности теплообменников воздушного охлаждения / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // Экология и промышленность. – 2017. – № 2 – С. 72–77.

4. Сухоцкий, А. Б. Экспериментальное исследование теплоотдачи однорядного пучка из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха и выбор формы представления результатов / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2017. – Т. 60, № 4. – С. 352–366.

5. Сухоцкий, А. Б. Исследование смешанноконвективной теплоотдачи однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников при различных поперечных шагах установки труб / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – № 19. – С. 3–11.

6. Сидорик (Маршалова), Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков // Труды БГТУ. Серия 1. Лесн. хоз-во, природопольз. и перераб. возоб. рес. – 2018. – № 1. – С. 85–93.

7. Сухоцкий, А. Б. Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над оребренным пучком / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // Тепловые процессы в технике. – 2018. – Т. 10. – № 1. – С. 62–70.

8. Сухоцкий, А. Б. Экспериментальное исследование и обобщение интенсифицированной конвективной теплоотдачи однорядных пучков ребристых труб в потоке воздуха / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, № 6. – С. 552–563.

9. Сухоцкий, А. Б. Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над многорядным оребренным пучком / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92. – № 3. – С. 619–625.

### **Статьи в сборниках трудов и материалов конференций**

10. Сидорик (Маршалова), Г. С. Экспериментальный стенд для исследования смешанной конвекции в ребристом пучке / Г. С. Сидорик // 66-ая научно-техническая конф. студентов и магистрантов: сб. науч. раб. 20–25 апреля 2015 г. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2015. – С. 289–290.

11. Сидорик (Маршалова), Г. С. Экспериментальный стенд для исследования смешанной конвекции в ребристом пучке / Г. С. Сидорик, А. Б. Сухоцкий // Четвертая всероссийская студенческая научно-техническая конференция «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология»: сб. матер. конф., 16–18 декабря 2015 г. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2015. – С. 3–6.

12. Сухоцкий, А. Б. Особенности расчета смешанной конвекции в аппаратах воздушного охлаждения / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс»: сб. науч. раб. 14 апреля 2016 г. – Старый Оскол: ООО «Ассистент плюс», 2016. – С. 181–185.

13. Сидорик (Маршалова), Г. С. Особенности расчета смешанной конвекции в аппаратах воздушного охлаждения / Г. С. Сидорик // 67-ая научно-техническая конф. студентов и магистрантов: сб. науч. раб. 18–23 апреля 2016 г. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2016. – С. 275–277.

14. Сидорик (Маршалова), Г. С. Экспериментальная установка для исследования свободноконвективного теплообмена ребристых труб воздухоохлаждаемых теплообменников / Г. С. Сидорик // Девятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: сб. докл. 5–8 октября 2016 г. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. – С. 419–422.

15. Сухоцкий, А. Б. Исследование свободно-конвективного теплообмена оребренной трубы при различных углах наклона / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана: сб. матер. научно-практ. конф. 13 октября 2016 г. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2016. – С. 126–128.

16. Сухоцкий, А. Б. Интенсификация свободной конвекции в однорядном оребренном пучке в аппаратах воздушного охлаждения / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // III Белорусско-Китайский молодежный инновационный форум «Новые горизонты – 2016»: сб. матер. 29–30 ноября 2016 года. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2016. – С. 72–73.

17. Сухоцкий, А. Б. Повышение энергоэффективности теплообменников воздушного охлаждения / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // VI Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды»: сб. науч. тр. 22–23 марта 2017 г., г. Харьков. – Х.: ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», 2017. – С. 25–30.

18. Сухоцкий, А. Б. Интенсификация теплоотдачи однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // XII Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Наука и образование – 2017»: сб. матер. 14 апреля 2017 г. – Астана: Евразийский нац. ун. им. Гумилёва– С. 7059–7063.

19. Сидорик (Маршалова), Г. С. Влияние определяющей температуры на теплоотдачу воздухоохлаждаемого теплообменника при смешанной конвекции / Г. С. Сидорик // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2017: сборник матер. конф. [Электронный ресурс] / Сост. Ю. С. Кузнецова; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. им. М. В. Ломоносова. – Электронные текстовые данные. – Архангельск: САФУ, 2017. – С. 1831–1836.

20. Сидорик (Маршалова), Г. С. Интенсификация теплоотдачи двухрядных пучков воздухоохлаждаемых теплообменников / Г. С. Сидорик // Международная молодёжная научная конференция «XXXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых)»: матер. конф. 8–10 ноября 2017 года. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2017. – Т. 1. – С. 961–967.

21. Сидорик (Маршалова), Г. С. Влияние поперечного шага установки труб в пучках однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников из ребристых труб при смешанно-конвективном теплообмене / Г. С. Сидорик // Седьмая российская национальная конференция по теплообмену: сб. тр. конф. 22–26 октября 2018 года. – Москва: МЭИ, 2018. – С. 458–460.

### **Тезисы докладов на конференциях**

22. Исследование свободно конвективного теплообмена в однорядном оребренном пучке воздухоохлаждаемых теплообменников / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова), В. Н. Фарафонов // Химическая технология и техника:



тезисы 81-й науч.-техн. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 1–12 февраля 2017 г. [Электронный ресурс] / отв. за издание И. В. Войтов; УО БГТУ. – Минск: БГТУ, 2017. – С. 42.

23. Сухоцкий, А. Б. Экспериментальное исследование и обобщение экспериментальных данных интенсифицированного свободноконвективного теплообмена однорядных пучков ребристых труб / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // Химическая технология и техника: тезисы 82-й науч.-техн. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 1–14 февраля 2018 г. [Электронный ресурс] / отв. за издание И. В. Войтов; УО БГТУ. – Минск: БГТУ, 2018. – С. 45.

### **Патенты**

24. Аэродинамическая труба малых скоростей для исследования теплообменных пучков: патент №11470 Респ. Беларусь, МПК G 01 M 9/02 (2006.01) / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // заявитель Белорусский государственный технологический университет. – № и 20170100, заявл. 16.03.2017; опубл. 30.08.2017.

25. Аэродинамическая труба малых скоростей для исследования теплообменных пучков: патент №11646 Респ. Беларусь, МПК G 01M 9/02 (2006.01) / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // заявитель Белорусский государственный технологический университет. – № и 20170355, заявл. 30.10.2017; опубл. 30.04.2018.

26. Аппарат воздушного охлаждения: патент №0300311, МПК F28D 7/00 (2006.01) F28F 9/22(2006.01) / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик (Маршалова) // заявитель Белорусский государственный технологический университет. – № 201700044, заявл. 19.12.2016; опубл. 31.07.2018.

### **Заявка на полезную модель**

27. Аппарат воздушного охлаждения с вытяжной шахтой / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова // Уведомление о положительном результате предварительной экспертизы по заявке на выдачу патента на полезную модель от 17.01.2019 г. Заявка № и 20180308; дата подачи 12.11.2018.

Маршалова Галина Сергеевна

## ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ

**Ключевые слова:** аппарат воздушного охлаждения, смешанная конвекция, вытяжная шахта, теплоотдача, аэродинамическое сопротивление, гейзерные течения, число Нуссельта, число Рейнольдса, число Грасгофа, число Ричардсона.

**Объект диссертационного исследования:** шахматный пучок биметаллических оребренных труб, используемый в аппаратах воздушного охлаждения.

**Предмет исследования:** закономерности теплообмена и аэродинамического сопротивления шахматных пучков биметаллических оребренных труб в режиме смешанной конвекции воздуха.

**Цель исследования:** разработка многопараметрической методики теплового расчета и рекомендаций по проектированию аппаратов воздушного охлаждения с позволяющей снизить электропотребление вытяжной шахтой.

**Полученные результаты.** Разработана экспериментальная установка и методика экспериментального исследования, позволяющие изучать теплоотдачу и аэродинамическое сопротивление пучков оребренных биметаллических труб в режиме смешанной конвекции. На основе результатов экспериментальных исследований получены многофакторные критериальные уравнения, учитывающие влияние геометрических параметров вытяжной шахты, числа рядов и внешних воздушных потоков, применительно к расчету средней теплоотдачи и аэродинамического сопротивления оребренных пучков в режиме смешанной конвекции. Изучена структура течения воздуха в пучке и вытяжной шахте, установлен негативный характер влияния гейзерных течений на теплоотдачу пучков труб и предложено конструктивное решение, позволяющее снизить этот эффект. Разработана многопараметрическая методика теплового расчета и предложены рекомендации по проектированию аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой.

**Область применения:** заводы-изготовители теплообменного оборудования, нефтеперерабатывающие, химические, нефтехимические предприятия, компрессорные станции, предприятия целлюлозно-бумажной промышленности, электростанции.

**РЭЗІЮМЕ**

Маршалава Галіна Сяргееўна

**ЦЕПЛАВЫ РАЗЛІК І ПРАЕКТАВАННЕ АПАРАТАЎ ПАВЕТРАНАГА АХАЛАДЖЭННЯ З ВЫЦЯЖНОЙ ШАХТАЙ**

**Ключавыя словы:** апарат паветранага ахаладжэння, змешаная канвекцыя, выцяжная шахта, цеплааддача, аэрадынамічнае супраціўленне, гейзерныя плыні, лік Нуссельта, лік Рейнольдса, лік Грасгофа, лік Рычардсана.

**Аб’ект дысертацыйнага даследавання:** шахматны пучок біметалічных рабрыстых труб, які выкарыстоўваецца ў апаратах паветранага ахаладжэння.

**Прадмет даследавання:** заканамернасці цеплаабмену і аэрадынамічнага супраціўлення шахматных пучкоў біметалічных рабрыстых труб у рэжыме змешанай канвекцыі паветра.

**Мэта даследавання:** распрацоўка шматпараметрычнай metodyкі цеплавога разліку і рэкамендацый па праектаванню апаратаў паветранага ахаладжэння з выцяжной шахтай, якая дазваляе знізіць электраспажыванне.

**Атрыманыя вынікі.** Распрацавана эксперыментальная ўстаноўка і metodyка эксперыментальнага даследавання, якія дазваляюць вывучаць цеплааддачу і аэрадынамічнае супраціўленне пучкоў рабрыстых біметалічных труб у рэжыме змешанай канвекцыі. На аснове вынікаў эксперыментальных даследаванняў атрыманы шматфактарныя крытэрыяльныя ўраўненні, якія ўлічваюць уплыў геаметрычных параметраў выцяжной шахты, колькасці шэрагаў і знешніх паветраных патокаў, у дачыненні да разліку сярэдняй цеплааддачы і аэрадынамічнага супраціўлення рабрыстых пучкоў ў рэжыме змешанай канвекцыі. Вывучана структура плыні паветра ў пучку і выцяжной шахце, усталяваны негатыўны характар уплыву гейзерных плыняў на цеплааддачу пучкоў труб і прапанавана канструктыўнае рашэнне, якое дазваляе знізіць гэты эффект. Распрацавана шматпараметрычная metodyка цеплавога разліку і прапанаваны рэкамендацыі на праектаванне апаратаў паветранага ахаладжэння з выцяжной шахтай.

**Вобласць выкарыстання:** заводы-вытворцы цеплаабменнага абсталявання, нафтаперапрацоўчыя, хімічныя, нафтахімічныя прадпрыемствы, кампрэсарныя станцыі, прадпрыемствы цэлюлозна-папяровай прамысловасці, электрастанцыі.

**SUMMARY**

Marshalova Halina Sergeevna

**THERMAL DESIGN AND MAKING OF AIR-COOLED EXHAUST SHAFT APPARATUS**

**Keywords:** air-cooled apparatus, mixed convection, exhaust shaft, heat transfer, aerodynamic drag, geyser flow, Nusselt number, Grashof number, Reynolds number, Richardson number.

**Object of research:** staggered finned bimetallic tube bundles used in air cooled apparatuses.

**Subject of research:** behavior of heat transfer and aerodynamic drag of staggered finned bimetallic tube bundle within the air mixed convection regime.

**The purpose of research:** developing many-parameter method of thermal design and making recommendations on air cooled apparatuses allowing electric energy consumption to be reduced by an exhausted shaft.

**The results obtained.** An experimental setup and an experimental method are developed for investigation of heat transfer and aerodynamic drag of finned bimetallic tube bundles under conditions of mixed convection. Based on the results of the experimental investigation, the multifactorial similarity equations, taking into account the influence of the exhaust shaft geometric parameters, a number of rows, external air flows above are obtained for calculation of mean mixed convection heat transfer and aerodynamic drag of finned tube bundles. The air flow structure in the bundle and exhaust shaft are studied, the negative influence of the geyser flow on the tube bundles heat transfer are established and a constructive solution for reducing this effect is proposed. Recommendations on the developing of air-cooled apparatus and a many-parametric method for thermal design of air-cooled exhaust shaft apparatus are proposed.

**Field of application:** heat transfer equipment manufacturing plants, oil refineries, chemical, oil-chemical plants, compressor stations, pulp and paper industry factories, power stations.