

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

УДК 621.565.93/.95-0.46.54(043.3)

Данильчик Екатерина Сергеевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕПЛООБМЕННИКОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
ПРИ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Минск 2022

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

Научный руководитель: **Сухоцкий Альберт Борисович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты: **Акулич Петр Васильевич**, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории химико-энергетических процессов Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси»

Конева Наталья Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры энергофизики Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация: Белорусский национальный технический университет

Защита состоится 26 апреля 2022 г. 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.

Телефон ученого секретаря совета: (+375 17) 320-83-87; 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 25 марта 2022 г.

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



Ю. В. Жукова

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение атмосферного воздуха, как дешевого и доступного теплоносителя, в процессах охлаждения технологических сред в различных отраслях промышленности обусловило появление целого ряда теплообменников воздушного охлаждения (ТВО), отличающихся друг от друга конструктивными особенностями и функциональным назначением. К ТВО относятся аппараты воздушного охлаждения (АВО) и воздухонагреватели, в частности калориферы для нагрева воздуха, теплообменники систем отопления и вентиляции зданий и сооружений.

Теплообменники воздушного охлаждения в основном функционируют в режиме вынужденной конвекции, в результате на привод вентиляторов затрачивается значительное количество электроэнергии. Одним из способов энергосбережения при эксплуатации ТВО является перевод их в режим функционирования при свободной конвекции с полным отключением электропривода вентиляторов отдельных секций аппарата при понижении температуры охлаждающего воздуха, обеспечивая при этом заданный тепловой режим. Известно, что недостатками такого режима являются малые коэффициенты теплопередачи и возрастающие массогабаритные характеристики аппаратов. Поэтому важными являются исследования, связанные с разработкой методов интенсификации теплообмена, которые позволят изменить геометрию теплопередающей поверхности, ее компоновочные характеристики, а также характер течения воздуха через теплообменные секции для их эффективной эксплуатации в режиме свободной конвекции. Одним из таких пассивных методов интенсификации внешнего свободно-конвективного теплообмена, способствующего увеличению силы естественной тяги воздуха, является установка вытяжной шахты над теплообменным пучком ТВО.

При эксплуатации ТВО в режиме свободной конвекции и при ее интенсификации существует необходимость соблюдения температурных режимов и точности их регулирования, что зависит от наличия достоверной информации о теплообмене обребренных пучков. Однако в существующих исследованиях не приведена информация об оптимальных геометрических характеристиках обребренных труб и компоновочных параметрах теплообменных секций ТВО, используемых в промышленности при свободно-конвективном теплообмене и при его интенсификации.

Таким образом, изложенное выше обосновывает актуальность задачи по повышению эффективности ТВО в режиме свободной конвекции.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Результаты диссертационной работы получены при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

– Гранта Министерства 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.);

– Проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по договору с Государственным научным учреждением «Институт тепло- и массообмена имени А. В. 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 г.);

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

– Гранта Министерства образования Республики Беларусь, научно-исследовательская работа № ГБ 20-052 «Свободно-конвективный теплообмен пучков из круглоребристых труб с различными компоновочными параметрами и размерами ребер в потоке воздуха» (2020 г., № г.р. 20200503 от 17.02.2020 г.);

– Проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по договору с Государственным научным учреждением «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси» № Т21РМ-019 «Комплексное исследование структуры потока, аэродинамического сопротивления и теплоотдачи в пучках труб с интенсификаторами теплообмена» (2021–2023 гг. № г.р. 20213366 от 01.06.2021 г.).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь, утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. № 190 «О приоритетных направлениях научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг.» (п. 1 – Энергетика), а также перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь, утвержденных указом Президента Республики Беларусь 22.04.2015 г. № 166 «О приоритетных направлениях научно-технической деятельности на 2016–2020 годы» (п. 1 – Энергетика и энергоэффективность, энергосбережение) и указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. № 156 «О приоритетных

направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы» (п. 3 – Энергетическая эффективность и энергосбережение).

Цель и задачи исследования

Цель исследования – повышение эффективности теплообменников воздушного охлаждения путем оптимизации высоты ребра труб и поперечного шага их установки в теплообменных секциях аппарата в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации, позволяющих экономить электрическую энергию.

Объект исследования – шахматный пучок биметаллических оребренных труб, применяемый в теплообменниках воздушного охлаждения.

Предмет исследования – процессы теплообмена при обтекании шахматного пучка оребренных труб в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) провести экспериментальное исследование теплоотдачи однорядного пучка биметаллических оребренных труб ТВО в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты, проанализировать полученные закономерности влияния высоты ребра труб на интенсивность теплоотдачи однорядного пучка, разработать обобщенные уравнения подобия;

2) провести экспериментальное исследование теплоотдачи шахматных пучков биметаллических оребренных труб ТВО в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты, проанализировать полученные закономерности влияния поперечного шага установки труб на интенсивность теплоотдачи одно- и многорядных пучков, разработать обобщенные уравнения подобия;

3) на основе анализа полученных закономерностей разработать рекомендации по оптимальной высоте ребра труб и поперечному шагу их установки в зависимости от угла наклона труб к горизонтальной плоскости, а также от числа рядов при работе ТВО режиме свободной конвекции;

4) на основе анализа полученных закономерностей разработать рекомендации по оптимальной высоте ребра труб и поперечному шагу их установки в зависимости от геометрических параметров вытяжной шахты и числа рядов при работе ТВО в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты;

5) усовершенствовать методику теплового расчета ТВО с вытяжной шахтой с учетом разработанных уравнений подобия по теплоотдаче и уточненной методики определения лучистой составляющей, провести сравнительную оценку работы аппарата в режимах вынужденной, свободной конвекции воздуха и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты.

Научная новизна

Впервые получены закономерности влияния высоты ребра труб при различных углах их наклона к горизонтальной плоскости на интенсивность теплоотдачи однорядного пучка оребренных биметаллических труб, что позволило разработать рекомендации по проектированию ТВО, эксплуатирующихся в режиме свободной конвекции.

Впервые для режима свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты, получены закономерности влияния высоты ребра труб на интенсивность теплоотдачи однорядного пучка, а также поперечного шага установки труб на интенсивность теплоотдачи двух- и четырехрядного пучков с учетом геометрических параметров вытяжной шахты, что позволило разработать рекомендации по проектированию ТВО с вытяжной шахтой.

Усовершенствована методика теплового расчета ТВО с вытяжной шахтой с учетом разработанных обобщающих уравнений по теплоотдаче и уточненной методики определения лучистой составляющей. Показано, что с ростом поперечного шага установки труб ТВО от 0,058 до 0,070 м удельная экономия электрической энергии в год в режиме свободной конвекции возрастает от 26 до 31% (от 29,2 до 35,4 т у. т. / МВт) по сравнению с режимом вынужденной конвекции, а в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты, от 31 до 36% (от 35,4 до 41,1 т у. т. / МВт) соответственно.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментального исследования теплообмена шахматных пучков биметаллических труб с различной высотой ребра (коэффициент оребрения в пределах $\phi = 1-19,3$) и при различных поперечных шагах установки труб с $\phi = 21$ в режимах свободной конвекции воздуха и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты, позволившие разработать новые обобщающие уравнения для определения среднего коэффициента теплоотдачи с учетом высоты ребра труб, компоновочных параметров пучка и геометрических параметров вытяжной шахты.

2. Оптимальные параметры пучков биметаллических оребренных труб, позволившие разработать рекомендации по проектированию ТВО, эксплуатирующихся в режиме свободной конвекции (высота ребра 0,002 м ($\phi = 2,8$); угол наклона к горизонтальной плоскости от 0–30°; поперечный шаг труб 0,070 м), основанные на полученных закономерностях влияния высоты ребра труб при различных углах их наклона к горизонтальной плоскости и поперечного шага установки труб в пучке на интенсивность теплоотдачи трубного пучка с учетом его массогабаритных характеристик.

3. Оптимальные параметры пучков биметаллических оребренных труб, позволившие разработать рекомендации по проектированию ТВО с вытяжной шахтой (высота ребра 0,008 м ($\varphi = 9,4$), поперечный шаг труб 0,058 м для одно-, 0,064 м для двух- и 0,070 м для четырехрядного пучка; коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка в диапазоне 0,7–1,5; относительная высота системы пучок–шахта для одно-, двух и четырехрядного пучков более 1,14, 0,57 и 0,29 соответственно), основанные на полученных закономерностях влияния высоты ребра труб, поперечного шага их установки в пучке и геометрических параметров вытяжной шахты на интенсивность теплоотдачи трубного пучка с учетом его массогабаритных характеристик.

4. Усовершенствованная методика теплового расчета ТВО с вытяжной шахтой с учетом разработанных обобщающих уравнений по теплоотдаче и уточненной методики определения лучистой составляющей.

Личный вклад соискателя ученой степени

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

Постановка цели, теоретических и экспериментальных задач, определения объекта, предмета исследований осуществлялась соискателем совместно с научным руководителем к.т.н. А. Б. Сухоцким.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований обсуждались с соавторами совместных публикаций д.т.н. В. Б. Кунтышем, к.т.н. Г. С. Маршаловой, к.ф.-м.н. Т. Б. Карлович, к.т.н. В. Н. Фарафоновым и к.т.н. С. В. Здитовецкой. В экспериментальных исследованиях по определению теплоотдачи четырехрядных пучков оребренных труб принимала участие к.т.н. Г. С. Маршалова.

Биметаллические оребренные трубы предоставлены ООО «Грибановский машиностроительный завод».

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на: 83-й и 84-й научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием) БГТУ (Минск, Беларусь, 2019 г. и 2020 г.); Международных научно-практических конференциях «Информационные технологии в политических, социально-экономических, правовых и технических системах» БНТУ (Минск, Беларусь, 2019 г., 2020 г. и 2021 г.); Международной молодежной научной конференции

«XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых)» КНИТУ-КАИ (Казань, Россия, 2019 г.); II Международной научно-технической конференции «Минские научные чтения – 2019» БГТУ (Минск, Беларусь, 2019 г.); Международной конференции «Инновационное развитие нефтегазовой отрасли, современная энергетика и их актуальные проблемы» Ташкентского химико-технологического института, (Ташкент, Узбекистан, 2020 г.).

Результаты диссертационного исследования использованы для выполнения теплотехнических расчетов интенсивных конструкций охладителей электронных устройств для ООО «БЕЛ ХУАВЭЙ ТЕХНОЛОДЖИС», что подтверждается справкой о практическом использовании. Результаты диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс по дисциплинам «Производство, транспорт и потребление тепловой энергии» и «Проектирование теплообменных аппаратов» УО «Белорусский государственный технологический университет». Также результаты диссертационного исследования, полученные при выполнении совместных российско-белорусских проектов № Т19 РМ-076 и № Т21РМ-019, использованы при выполнении договора с АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа», что подтверждается актом практического использования.

Опубликование результатов диссертации

Результаты работы опубликованы в 9 статьях в рецензируемых научных изданиях (5,6 авт. л.), в том числе в 6 статьях в научных изданиях перечня изданий ВАК РБ (3,4 авт. л.), в 9 статьях в сборниках трудов и материалов научных конференций (1,4 авт. л.) в 2 патентах на полезную модель (0,6 авт. л.).

Общее количество научных публикаций – 20, общий объем опубликованного материала – 7,6 авт. л.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации – 194 стр.; общее количество рисунков – 52, таблиц – 19, использованных источников – 124 (на 10 стр.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

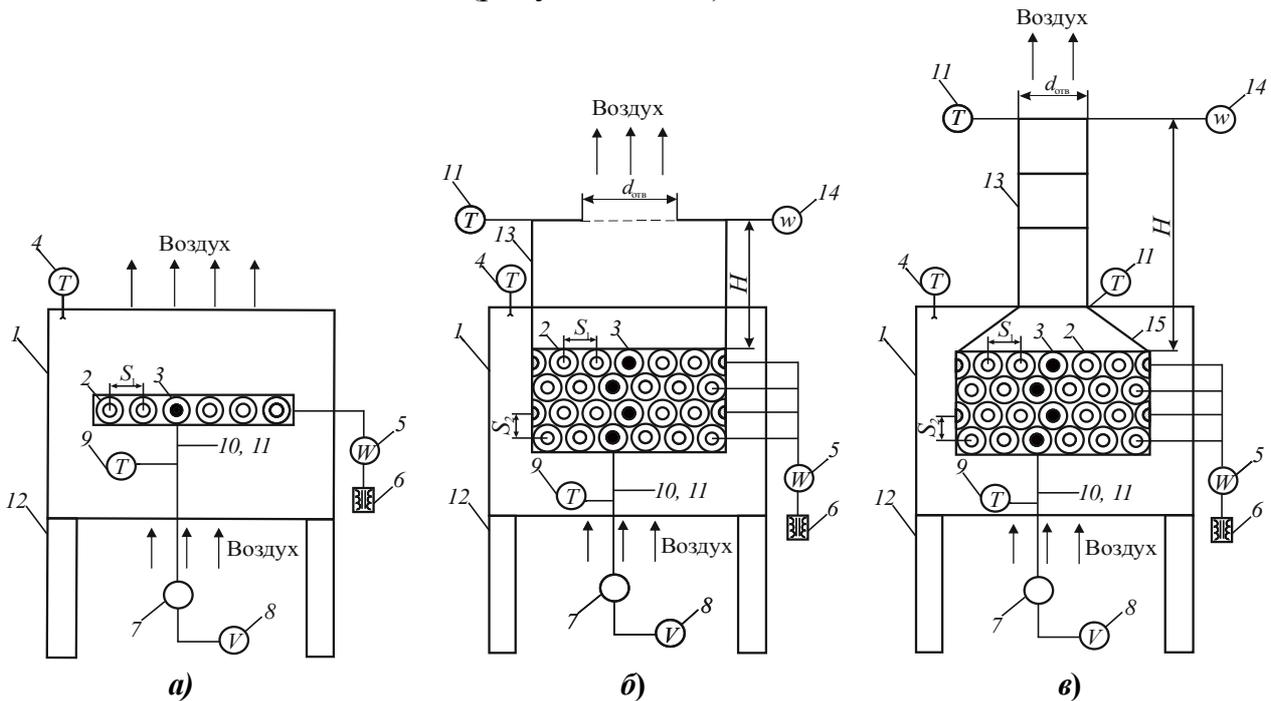
Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, дан краткий анализ изучаемой проблемы, определены основные направления исследований.

В **первой главе** выполнен обзор основных конструкций ТВО. Проведен анализ современного состояния исследований в области свободно-конвективного теплообмена оребренных труб с круглыми ребрами различных геометрических параметров, а также оребренных пучков труб с различными углами

наклона и компоновочными параметрами теплообменных секций. Представлен обзор методов интенсификации свободно-конвективного теплообмена пучков оребренных труб.

На основании изучения отечественной и зарубежной литературы был обоснован выбор направлений исследования, сформулирована цель работы, поставлены задачи исследования.

Во **второй главе** представлено описание экспериментальной установки (рисунок 1) и методики исследования теплоотдачи пучков оребренных труб в режимах свободной конвекции воздуха (рисунок 1, а) и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты (рисунок 1, б, в).



1 – камера; **2** – трубный пучок; **3** – труба-калориметр; **4** – лабораторный термометр; **5** – ваттметры; **6** – масляной трансформатор; **7** – переключатель;

8 – вольтметр; **9** – сосуд Дьюара; **10** – хромель-алюмелевые термопары;

11 – четырехспайные медь-константановые термопары; **12** – опоры;

13 – вытяжная шахта; **14** – термоанемометр; **15** – конфузур

Рисунок 1. – Схема экспериментальной установки: **а)** без шахты, **б)** с вытяжной шахтой с регулируемым проходным сечением, **в)** с вытяжной шахтой с регулируемой высотой

Экспериментальные исследования проводились методом полного теплового моделирования трубного пучка. Обогрев труб осуществлялся с помощью вставных теплоэлектронагревателей. Центральные трубы каждого ряда пучка являлись калориметрами, на них измерялись значения мощности и температуры стенки у основания ребер для определения приведенного среднего коэффициента теплоотдачи конвекцией.

Для интенсификации свободно-конвективного теплообмена воздуха над пучком труб устанавливались два типа шахт – с регулируемой площадью выходного отверстия в пределах $f_{\text{отв}} = 0,0064-0,1185 \text{ м}^2$ при высоте шахты 0,52 м (шахта 1, рисунок 1, а) и с регулируемой высотой в пределах $H = 0,52-2,10 \text{ м}$ при диаметре шахты 0,105 м (шахта 2, рисунок 1, в).

По результатам каждой серии экспериментов рассчитывался средний приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, отнесенный к полной наружной поверхности трубы:

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

где Q_k – конвективный тепловой поток, Вт;

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

t_0 – температура воздуха в камере, $^\circ\text{С}$;

$F = \pi l d_0 \varphi$ – площадь теплоотдающей поверхности трубы-калориметра, м^2 ;

l – теплоотдающая длина трубы-калориметра, м;

$d_0 = d - 2h$ – диаметр трубы у основания ребра, м;

d – наружный диаметр оребрения, м;

h – высота ребра, м;

$\varphi = F/F_n = 1 + 2h(d_0 + h + \Delta)/(s d_0)$ – коэффициент оребрения трубы;

F_n – площадь поверхности трубы по основанию ребер (площадь гладкой трубы), м^2 ;

s – шаг ребра, м;

Δ – средняя толщина трапециевидного ребра, м.

Тепловой поток Q_k , Вт, отведенный от трубы к воздуху конвекцией, определялся по формуле

$$Q_k = W - Q_{\text{л}} - Q_{\text{п}}, \quad (2)$$

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

$Q_{\text{л}}$ – количество теплоты, переданное от трубы к воздуху излучением, Вт;

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

Расчет теплового потока излучением от калориметра к окружающему воздуху в режиме свободной конвекции проводился зональным методом (рисунок 2, а), где зона 1 – окружающая среда; зона 2 – наружные половины труб крайних поперечных рядов; зона 3 – остальная часть пучка.

*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 л.

При интенсификации свободно-конвективного теплообмена с помощью установки над теплообменным пучком вытяжной шахты использовалась уточненная в диссертационной работе методика расчета лучистой составляющей, (рисунок 2, б), где верхняя зона 1 становится зоной вытяжной шахты 4 с температурой стенок $t_{ш}$.

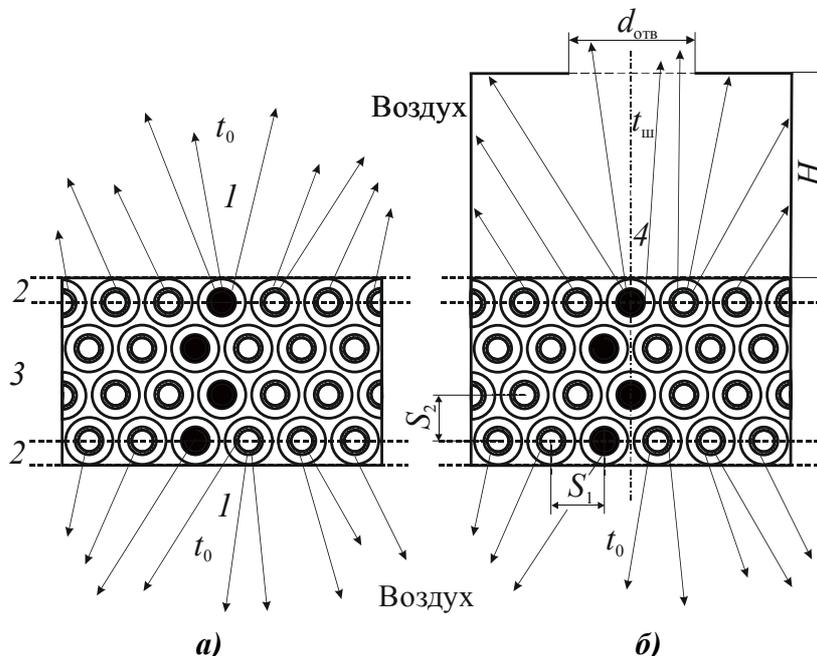


Рисунок 2. – Схема к расчету лучистой составляющей пучка без шахты (а) и с шахтой (б)

Полагая, что внутренние стенки шахты являются абсолютно черным телом, формула для расчета теплового потока, отведенного излучением от пучка оребренных труб и представленного в виде двух составляющих, Вт: $Q_{л}^0$ – к окружающей среде (наружному воздуху) и $Q_{л}^{ш}$ – к вытяжной шахте, примет вид

$$Q_{л} = Q_{л}^0 + Q_{л}^{ш}, \quad (3)$$

$$Q_{л}^0 = (0,5 + \gamma) c_0 \varepsilon_{эф} F \varphi_{т-с} \frac{(\Phi_{1-3} + \Phi_{2-3}(z-1))}{z} \left[\left(\frac{273 + t_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{к}}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

$$Q_{л}^{ш} = (0,5 - \gamma) c_0 \varepsilon_{эф} F \varphi_{т-с} \frac{(\Phi_{1-3} + \Phi_{2-3}(z-1))}{z} \left[\left(\frac{273 + t_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{ш}}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где $\gamma = 0,5 \cdot f_{отв} / (f_{ш} + f_{отв})$ – коэффициент излучения в отверстие шахты ($0 \leq \gamma \leq 0,5$);

$f_{ш}$ – площадь образующей полусферы, $f_{ш} = 2\pi H^2$, м²;

Φ_{T-c} , Φ_{1-3} , Φ_{2-3} – угловые коэффициенты излучения, определяемые по методике зональным методом (А. В. Самородова);

$t_k = t_0$ – температура поверхности камеры, пола и потолка вокруг пучка, равная температуре воздуха в камере, °С;

$t_{ш}$ – средняя температура воздуха в шахте, °С.

Определено, что неучет $Q_{л}^{III}$ при определении α_k приводит к занижению результата на 5–15% при числах Рейнольдса в интервале $Re = 120–2100$.

Торцевые тепловые потери $Q_{п}$ и эффективная степень черноты $\varepsilon_{эф}$ всех калориметров определялись по результатам предварительных опытов на теплоизолированной и зачерненной копотью трубе.

Результаты экспериментов представлялись в виде чисел подобия Нуссельта $Nu = \alpha_k d_0 / \lambda$; Релея $Ra = \beta g d_0^3 (t_{ст} - t_0) / (\nu a)$ и Рейнольдса $Re = w d_0 / \nu$, где w – скорость в сжатом сечении пучка, м/с. Определяющей температурой являлась температура окружающего воздуха t_0 , характерным размером диаметр трубы у основания ребра d_0 . Среднее значение α_k всего пучка для заданного теплового режима определяли по формуле (1), где значение $t_{ст}$ – среднее арифметическое по показаниям термопар для всех калориметров пучка, значения Q_k и F равны соответственно суммарным значениям этих величин всех калориметров.

Отклонение экспериментальных значений Nu , Ra , Re от расчетных во всем диапазоне тепловой нагрузки не превышает до $\pm 4,2$; $5,3$; $7,5\%$ соответственно.

Правильность и надежность, принятой методики расчета и обработки результатов экспериментальных данных проверялись в тарировочных опытах, в которых исследовалась закопченная гладкая цилиндрическая алюминиевая труба диаметром $0,025$ м и длиной $0,3$ м со степенью черноты равной $0,9$. Расхождение экспериментальных значений теплоотдачи для гладкого одиночного горизонтального цилиндра в условиях свободной конвекции с результатами исследований М.А. Михеева и В. Моргана не превысило 3% .

Эффективная степень черноты $\varepsilon_{эф}$ калориметров с различной высотой ребра (таблица 1) и с $\varphi = 21$ определялась путем зачернения их копотью отработанного машинного масла и составила от $0,27$ до $0,65$.

Проведен сравнительный анализ соответствия скоростей потоков в пучках, определяемых с помощью уравнения теплового баланса, и скорости, измеренной термоанемометром Testo 425, который показал хорошую согласованность результатов.

Тарировочные опыты показали, что экспериментальная установка и ее аппаратное оснащение, конструкция трубы-калориметра, а также принятая методика проведения эксперимента и обработки данных обеспечивают достаточную точность и достоверность исследования теплоотдачи пучков труб в условиях свободной конвекции и при ее интенсификации.

В третьей главе изложены результаты экспериментального исследования теплоотдачи однорядных пучков оребренных труб с различной высотой ребра ТВО в условиях свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты, проведен анализ и обобщение полученных данных.

Исследования выполнены на стандартных промышленных биметаллических оребренных трубах со спиральными накатными ребрами с коэффициентом оребрения $\phi = 19,3$ (I тип). Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы диаметром $d_n = 0,025$ м и толщиной стенки $\delta = 0,002$ м – углеродистая сталь. Для изменения высоты ребер труб пучка они стачивались путем шлифования с образованием новых типов II–VI. Компоновка однорядных пучков проводилась с постоянным относительным поперечным шагом $\sigma_1 = S_1/d = 1,14$ (таблица 1) из $n = 6$ труб.

Таблица 1. – Геометрические параметры труб ($d_0 \times s \times l = 0,0268 \times 0,0025 \times 0,3$ м) однорядного пучка и его поперечный шаг

Тип пучка труб	ϕ	$d \cdot 10^3$, м	$\Delta \cdot 10^3$, м	$h \cdot 10^3$, м	h/s	S_1 , м
I	19,3	56,0	0,5	14,6	5,84	0,064
II	15,1	50,8	0,55	12,0	4,80	0,0579
III	9,4	42,8	0,6	8,0	3,20	0,0488
IV	4,8	35,0	0,7	4,1	1,64	0,0399
V	2,8	30,8	0,7	2,0	0,8	0,0351
VI	→ 1	26,8	–	0–0,2	→ 0	0,0306

Примечание. h/s – относительная высота ребра трубы.

Экспериментальные данные каждой серии по теплоотдаче в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты аппроксимировались уравнением вида

$$Nu = ARa^n [1 - \exp(-B / Ra)], \quad (6)$$

где A , n , B – коэффициенты, зависящие от геометрических параметров оребренных труб и компоновочных характеристик пучка, а при интенсификации свободной конвекции с помощью вытяжной шахты и от ее геометрических параметров.

Для пучка труб с $h/s = 5,84$ при $Ra \geq 250\,000$ в обоих тепловых режимах с увеличением мощности, подаваемой на пучок, наблюдалось снижение интенсивности темпа роста теплоотдачи B вследствие возрастающего межреберного аэродинамического сопротивления. При h/s в интервале от 0 до 4,80 экспонен-

циальным множителем в уравнении (6) можно пренебречь ($B \rightarrow \infty$) с получением традиционной зависимости.

Экспериментальное исследование теплоотдачи однорядного пучка труб с различной высотой ребра в режиме свободной конвекции проводилось при различных углах наклона оси труб к горизонтальной плоскости в пределах $\gamma = 0-90^\circ$. Получены зависимости поправочных коэффициентов $C_\gamma = Nu_\gamma^{h/s} / Nu_{\gamma=0}^{h/s}$ на угол наклона γ к горизонту с отклонением $\pm(2-10)\%$ для различных типов однорядного пучка (рисунок 3, а) и поправочных коэффициентов $C_{h/s} = Nu_{h/s}^\gamma / Nu_{h/s \rightarrow 0}^\gamma$ на относительную высоту ребра h/s труб однорядного пучка при различных углах его наклона γ . Для оценки увеличения теплового потока ребренного пучка по сравнению с гладким пучком использовался коэффициент $C_{h/s} \Phi = C'_{h/s} = (\alpha_\kappa F)_{h/s} / (\alpha_\kappa F)_{h/s \rightarrow 0}$ с отклонением $\pm(2-18)\%$ (рисунок 3, б). Коэффициенты определялись как среднее арифметическое расчетных точек на исследованном диапазоне $Ra = 33\,000-460\,000$.

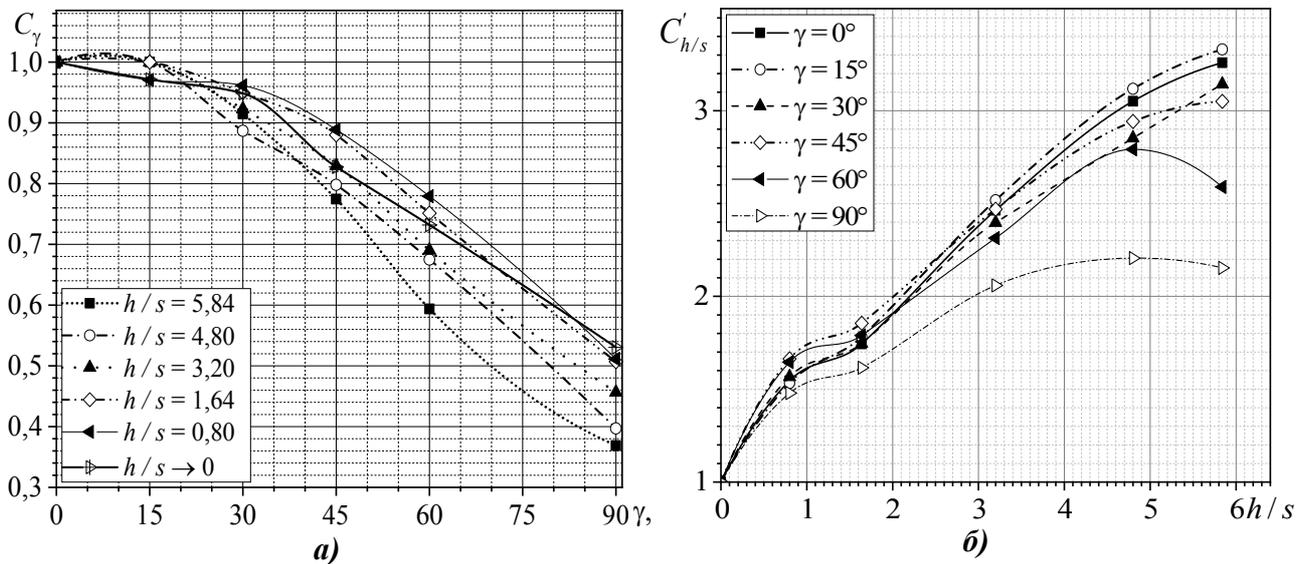


Рисунок 3. – Графические зависимости поправочных коэффициентов:
а) $C_\gamma = f(\gamma)$, б) $C'_{h/s} = f(h/s)$ при определении теплоотдачи однорядного пучка различных типов I–VI при углах наклона в пределах $\gamma = 0-90^\circ$ в режиме свободной конвекции

Экспериментальные данные по теплоотдаче однорядного пучка в режиме свободной конвекции с погрешностью от 12 до 28% обобщены уравнением вида

$$Nu = 0,943 \cdot Ra^{0,18} C_\gamma^0 C_{h/s}^\gamma \quad (7)$$

где C_γ^0 – поправочный коэффициент для гладкого горизонтального однорядного пучка на угол наклона к горизонту в интервале $\gamma = 15-90^\circ$ (рисунок 3, а, сплошная жирная линия);

$C_{h/s}^{\gamma} = C_{h/s}' / \varphi$ – поправочный коэффициент для гладкого однорядного пучка при углах наклона в интервале $\gamma = 0-90^{\circ}$ на относительную высоту ребра труб в пределах $h/s = 0,8-5,84$ (рисунок, 3 б, коэффициент оребрения φ из таблицы 1).

Установлено, что с уменьшением высоты ребра труб однорядного пучка интенсивность теплоотдачи возрастает в 1,8–6,3 раза (с увеличением угла наклона труб пучка снижается в диапазоне $\gamma = 0-30^{\circ}$ до 10%, рисунок 3, а), при этом коэффициент увеличения теплового потока оребренного пучка уменьшается в 1,5–3,3 раза (рисунок 3, б).

Экспериментальные данные по теплоотдаче однорядного пучка труб с различной высотой ребра в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты, с отклонением, не превышающим $\pm(5-8)\%$, обобщались уравнением (6), где коэффициент A имеет следующий вид:

$$\text{для шахты 1} \quad A = a - bc^{\chi_{\text{ш}}}, \quad (8)$$

$$\text{для шахты 2} \quad A = dH_{\text{п-ш}}^k, \quad (9)$$

где a, b, c, d, k – коэффициенты, зависящие от геометрических параметров оребренных труб, компоновочных характеристик пучка и геометрических параметров вытяжной шахты (таблица 2);

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

$f_{\text{сж}} = nS_1 [1 - (d_0 + 2h\Delta / s) / S_1]$ – площадь сжатого сечения пучка, м^2 ;

$H_{\text{п-ш}} = HS_1\chi / (d_0^2 z\varphi\pi)$ – относительная высота системы пучок–шахта,

χ – коэффициент загромождения оребренными трубами поперечного сечения пучка для прохода воздуха;

z – число рядов в пучке, шт.

Таблица 2. – Значения постоянных a, b, c, d, k и n в уравнениях (6), (8) и (9) при $B = 6 \cdot 10^5$ для I-го типа пучка и $B \rightarrow \infty$ для типов II–VI

Постоянные	Тип пучка					
	I	II	III	IV	V	VI
n	0,44	0,33	0,32	0,3	0,26	0,18
Шахта 1						
a	0,139	0,139	0,185	0,191	0,338	1,836
b	0,136	0,130	0,168	0,202	0,202	7,510
c	0,798	0,314	0,326	0,107	0,215	0,065
Шахта 2						
d	0,0117	0,0496	0,0824	0,1486	0,3005	1,7059
k	0,32	0,30	0,29	0,27	0,16	0,14

Уравнения (6), (8) и (9) действительны в интервалах $Ra = 19\,000\text{--}380\,000$, $\chi_{ш} = 0,15\text{--}4,67$, $H_{п-ш} = 0,37\text{--}3,67$.

Выявлено, что установка вытяжной шахты над пучком позволяет увеличить интенсивность теплоотдачи в 1,1–2,7 раза.

Полученные результаты по теплоотдаче различных типов однорядного пучка аппроксимировались также зависимостями $Nu = f(Re)$, которые не зависят от геометрических параметров вытяжной шахты, а определяются только параметрами теплообменного пучка, в частности высотой ребра его труб (рисунок 4).

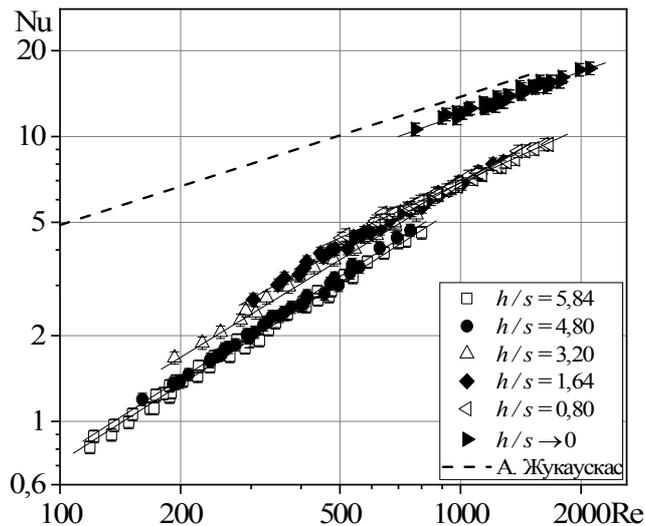


Рисунок 4. – Теплоотдача однорядного пучка труб с различной высотой ребра

Для однорядного пучка гладких труб (тип VI) была получена качественная сходимость результатов с данными для первых рядов шахматных пучков А. Жукаускаса. Для расчета теплоотдачи однорядного пучка труб с различной высотой ребра получены обобщающие уравнения следующего вида:

в диапазоне $h/s = 0,8\text{--}5,84$ с отклонением $\pm(7,5\text{--}15)\%$ и $Re = 500\text{--}2100$

$$Nu = (0,0125 + 0,236 \cdot 0,225^{h/s}) Re^{0,918 - 0,424 \cdot 0,539^{h/s}}, \quad (10)$$

в диапазоне $h/s \approx 0\text{--}0,8$ с отклонением $\pm 7,5\%$, $Re = 120\text{--}1700$

$$Nu = (0,38 - 0,37 \cdot h/s) Re^{0,5 + 0,175 \cdot h/s}. \quad (11)$$

Установлено, что при уменьшении высоты ребра труб однорядного пучка интенсивность теплоотдачи по сравнению с гладким пучком (тип VI) снижается для I типа пучка в 2,3 раза, II – в 2,2 раза, III – в 1,9 раза, IV и V – в 1,8 раза. При этом интенсивность теплоотдачи однорядного пучка, отнесенная к поверхности труб по основанию ребер, с увеличением их высоты возрастает в 1,7–9 раз (рисунок 5).

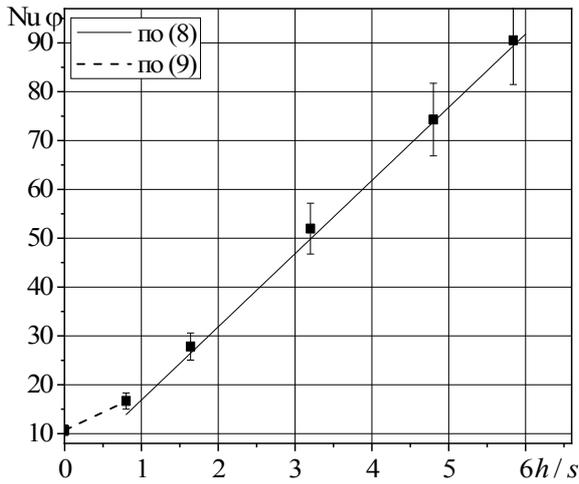


Рисунок 5. – Зависимость теплоотдачи однорядного пучка, отнесенной к площади поверхности труб по основанию ребер, от относительной высоты их ребра при $Re = 800$

Проведена оценка массогабаритных характеристик различных типов однорядных пучков при исследованиях их теплоотдачи в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты (рисунок 6).

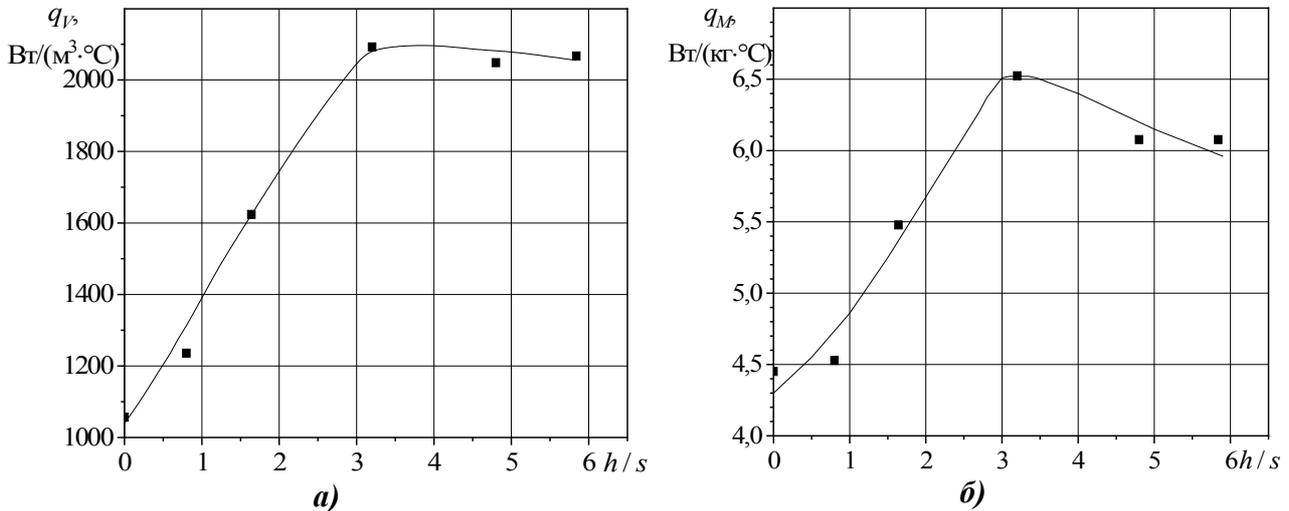


Рисунок 6. – Зависимости объемной (а) и массовой (б) плотности теплового потока от относительной высоты ребра труб однорядного пучка при $Re = 800$

Использовались показатели объемной и массовой плотности теплового потока q_V , $Вт/(м^3 \cdot °С)$, и q_M , $Вт/(кг \cdot °С)$:

$$q_V = \frac{Q_k}{V_r(t_{ct} - t_0)} = \frac{\alpha_k(t_{ct} - t_0)F}{V_r(t_{ct} - t_0)} = \frac{\alpha_k F}{V_r}, \quad (12)$$

где $V_r = lS_1d$ – габаритный объем, занимаемый одной трубой, $м^3$;

$$q_M = \frac{Q_k}{M(t_{ct} - t_0)} = \frac{\alpha_k(t_{ct} - t_0)F}{M(t_{ct} - t_0)} = \frac{\alpha_k F}{M}, \quad (13)$$

где M – масса алюминиевого оребрения одной трубы, $кг$.

Определено, что наиболее выгодным с учетом занимаемого габаритного пространства пучка и экономически целесообразным по использованию алюминиевого оребрения его труб в условиях свободной конвекции воздуха является однорядный пучок V типа. При установке вытяжной шахты над однорядным пучком наиболее энергетически выгодным является пучок III типа.

В **четвертой главе** приведены результаты экспериментального исследования теплоотдачи пучков оребренных труб с различными поперечными шагами установки труб ТВО в условиях свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты, проведен анализ и обобщение полученных данных.

Исследования выполнены на стандартных промышленных биметаллических оребренных трубах со спиральными накатными ребрами следующих параметров: $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 0,0568 \times 0,0264 \times 0,0152 \times 0,00243 \times 0,00055 \times 0,3$ м, $\varphi = 21$. Материал оребрения и несущей трубы как у труб выше. Изучались горизонтально расположенные шахматные равносторонние одно-, двух- и четырехрядные пучки с поперечными и диагональными шагами $S_1 = S_2' = 0,058; 0,064$ и $0,07$ м ($\sigma_1 = \sigma_2' = S_1/d = 1,021; 1,13; 1,23$).

Экспериментальные данные по теплоотдаче пучков с различными поперечными шагами установки труб с отклонением, не превышающим $\pm(5-18)\%$, обобщены уравнением (6), которое охватывает теплоотдачу в режимах свободной конвекции воздуха, а также при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты 1, коэффициент A здесь имеет вид

$$A = A_0 C_{\chi_{\text{ш}}} = A_0 \left(1 + \exp \left(- \frac{\chi_{\text{ш}}}{\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}} - \chi_{\text{ш}}^0} \right) \left(\frac{\chi_{\text{ш}}}{\chi_{\text{ш}}^0} - 1 \right) \right), \quad (14)$$

где $C_{\chi_{\text{ш}}}$ – поправочный коэффициент на сужение площади выходного отверстия вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка $\chi_{\text{ш}}$;

A_0 – коэффициент при свободной конвекции;

$\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}}$ и $\chi_{\text{ш}}^0$ – оптимальный и нулевой коэффициенты сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка, при которых значение числа Нуссельта максимально и равно его значению при свободной конвекции пучка ($C_{\chi_{\text{ш}}} = 1$).

Для обобщения данных при установке над пучками шахты 2 использовались уравнения (6) и (9) с отклонением до $\pm 5\%$.

Значения постоянных A_0 , $\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}}$, $\chi_{\text{ш}}^0$, d и k , степени n и темпа роста теплоотдачи B в уравнениях (6), (9) и (14) приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Значения постоянных A_0 , $\chi_{ш}^{opt}$, $\chi_{ш}^0$, d , k , n и B в уравнениях (6), (9) и (14) и диапазоны применимости по $\chi_{ш}$ и $H_{п-ш}$ для теплоотдачи трубных пучков при $Ra = 16\ 000\text{--}340\ 000$

Параметры	Тип пучка								
	Однорядный			Двухрядный			Четырехрядный		
S_1 , м	0,058	0,064	0,070	0,058	0,064	0,070	0,058	0,064	0,070
σ_1	1,021	1,13	1,23	1,021	1,13	1,23	1,021	1,13	1,23
n	0,48	0,44	0,43	0,48	0,44	0,43	0,48	0,44	0,43
Шахта 1									
$\chi_{ш}$ (при $B \cdot 10^{-5}$)	0,20–2,66 (∞)	0,16–0,60 (6); 0,9–2,14 (∞)	0,13–0,76 (6); 1,04–1,67 (∞)	0,20–2,66 (∞)	0,16–0,36; 2,14 (6); 0,60–1,25 (∞)	0,13–0,30; 1,67 (6); 0,50–1,04 (∞)	0,20–2,66 (∞)	0,16–0,36; 2,14 (4,4); 0,60–1,25 (∞)	0,13–0,50; 1,67 (5); 0,75–1,04 (∞)
$\chi_{ш}^{opt}$	1,167	1,476	1,509	0,991	0,865	0,812	0,810	0,749	0,744
$\chi_{ш}^0$	0,114	0,210	0,243	0,121	0,145	0,167	0,143	0,154	0,189
A_0	0,0042	0,0077	0,0078	0,0030	0,0072	0,0091	0,0019	0,0046	0,0074
Шахта 2									
$H_{п-ш}$ (при $B \cdot 10^{-5}$)	0,28–1,14 (∞)	0,35–1,42 (6)	0,42–1,69 (6)	0,14–0,57 (∞)	0,17–0,71 (6)	0,21–0,85 (6)	0,07–0,29 (∞)	0,09–0,35 (4,4)	0,10–0,42 (5)
d	0,0116	0,0111	0,008	0,0123	0,0137	0,0112	0,0096	0,0101	0,0098
k	0,37	0,29	0,31	0,46	0,32	0,25	0,46	0,24	0,18

Установлено, что при увеличении поперечного шага труб интенсивность теплоотдачи однорядного пучка растет, достигая максимума при $\sigma_1 = 1,13$, а далее незначительно снижается (в 1,1 раза) при шаге $\sigma_1 = 1,23$, практически неподвижный межтрубный поток создает дополнительное аэродинамическое сопротивление движению обтекающего потока. Для двухрядного и четырехрядного пучков она растет, достигая максимума при наибольшем шаге $\sigma_1 = 1,23$, и больше теплоотдачи с шагом $\sigma_1 = 1,021$ в 1,7 раза, с шагом $\sigma_1 = 1,13$ в 1,2 раза для двухрядного пучка (в 2,2 раза и 1,4 раза для четырехрядного пучка соответственно) вследствие увеличения шага труб и уменьшения аэродинамического сопротивления пучка.

Получено, что установка над пучком вытяжной шахты позволяет увеличить интенсивность теплоотдачи однорядного пучка в 1,1–4,2 раза, двухрядного – в 1,1–3,3 раза и четырехрядного в 1,2–2,8 раза. При этом увеличение поперечного шага труб пучка и числа рядов способствует меньшему росту интенсивности теплоотдачи.

Определено, что с увеличением площади выходного отверстия шахты коэффициент теплоотдачи трубных пучков увеличивается, достигая максимума при $\chi_{ш}^{opt}$, после чего она снижается из-за обратных потоков холодного воздуха в шахту и стремится к коэффициенту теплоотдачи пучка при свободной конвекции воздуха.

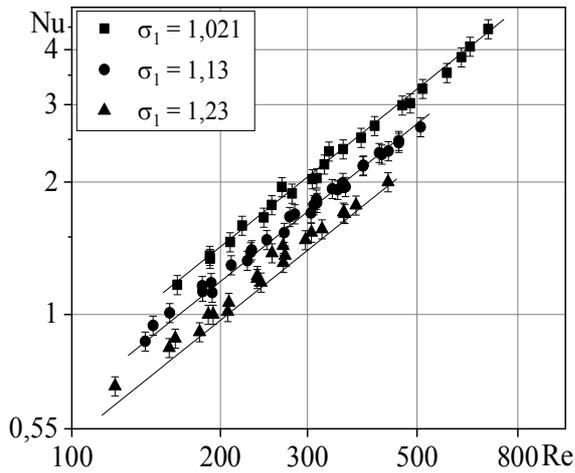
Изучено влияние геометрических параметров вытяжной шахты на интенсивность теплоотдачи трубных пучков в диапазоне $Ra = 16\ 000–340\ 000$, в результате чего определены их следующие оптимальные значения: $0,7 \leq \chi_{ш} \leq 1,5$ и для одно-, двух и четырехрядного пучков $H_{п-ш} \geq 1,14, 0,57$ и $0,29$ соответственно.

Экспериментальные данные по теплоотдаче пучков с различными поперечными шагами установки труб в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты, с погрешностью до 7,5% обобщены также уравнением вида (рисунок 7)

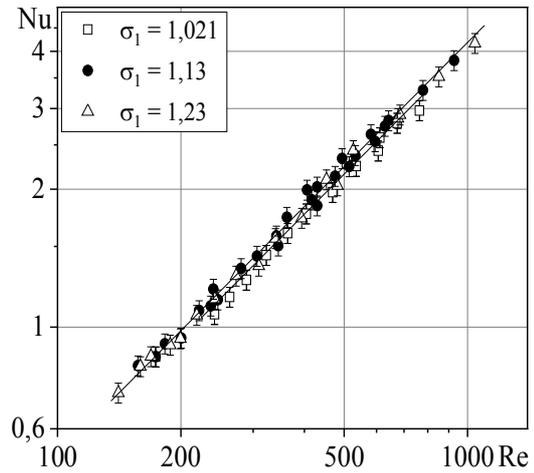
$$Nu = [(0,148 \cdot 0,209^z) + (0,0045 - 0,162 \cdot 0,14^z)\sigma_1] Re^{0,9}. \quad (15)$$

Уравнение (15) действительно в интервале $Re = 120–1000$.

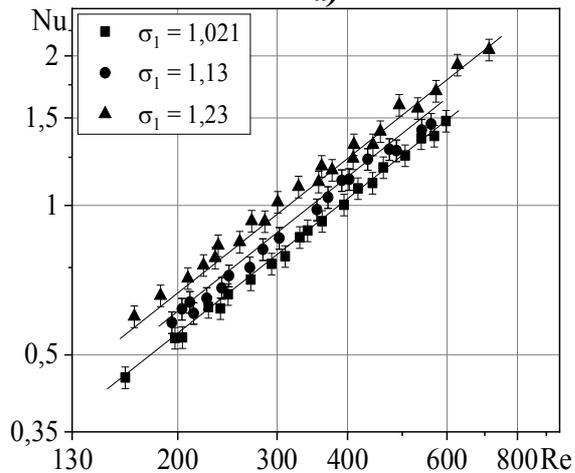
Установлено, что при увеличении поперечного шага труб интенсивность теплоотдачи однорядного пучка падает ($\sigma_1 = 1,13$ в 1,2 раза и $\sigma_1 = 1,23$ в 1,4 раза), для двухрядного пучка она практически не изменяется, в случае четырехрядного пучка возрастает ($\sigma_1 = 1,021$ в 1,2 раза и $\sigma_1 = 1,13 - 1,1$ раза). С увеличением числа рядов интенсивность теплоотдачи пучка снижается, что объясняется увеличением аэродинамического сопротивления и снижением среднего температурного напора пучка.



a)



б)



в)

Рисунок 7. – Теплоотдача а) одно-, б) двух- и в) четырехрядного пучков при различных относительных поперечных шагах установки труб

В **пятой главе** представлена усовершенствованная методика теплового расчета ТВО с вытяжной шахтой с учетом разработанных обобщающих уравнений и уточненной методики определения лучистой составляющей, где искомой величиной является максимальная температура наружного воздуха, при которой обеспечивается охлаждение продукта до заданной температуры. С помощью данной методики, а также с учетом рекомендаций по проектированию ТВО с вытяжной шахтой проведен расчет двухсекционного четырехрядного двухвентиляторного ТВО для охлаждения природного газа с теплообменной секцией шахматной равносторонней компоновки биметаллических оребренных труб с $\phi = 21$ при различных поперечных шагах их установки $S_1 = 0,058, 0,064$ и $0,07$ м и продольных шагах $S_2 = 0,0502; 0,0554; 0,0606$ м соответственно. Результаты расчета сопоставлены с данными расчета этого теплообменника в режимах свободной и вынужденной конвекции. Получено, что для расчетной тепловой нагрузки $Q = 1,68$ МВт аппарата, максимальная температура окружающей среды, при которой возможно использовать ТВО с одним выключенным вентилятором, при $S_1 = 0,058$ м составляет 15 °С, при $S_1 = 0,064$ м – $16,5$ °С и при $S_1 = 0,070$ м – $17,8$ °С, что на $2-3,3$ °С больше, чем для такого аппарата, работающего в режиме свободной конвекции.

Определено, что с ростом поперечного шага установки труб ТВО от 0,058 до 0,070 м удельная экономия электрической энергии в год в режиме свободной конвекции возрастает от 26 до 31% (от 29,2 до 35,4 т у. т. / МВт) по сравнению с режимом вынужденной конвекции, а в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты, от 31 до 36% (от 35,4 до 41,1 т у. т. / МВт) соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнены экспериментальные исследования теплоотдачи однорядного пучка биметаллических оребренных труб с различной высотой ребра (в диапазоне $h \approx 0-0,0146$ м, $h/s \approx 0-5,84$, $\phi = 1-19,3$) с шагом $\sigma_1 = 1,14$ в режимах свободной конвекции (также при различных углах наклона к горизонтальной плоскости в интервале $\gamma = 0-90^\circ$) и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты [1, 4, 6, 7, 9-18]. Получены обобщающие зависимости в виде: для режима свободной конвекции – $Nu = f(Ra, C_\gamma^0, C_{h/s}^\gamma)$ с погрешностью от 12 до 28%; при интенсификации свободной конвекции – $Nu = f(Ra, \chi_{ш})$, $Nu = f(Ra, H_{п-ш})$ – от 5 до 8% и $Nu = f(Re, h/s)$ – от 7,5 до 15% [7, 9, 18].

2. Впервые получены закономерности по влиянию высоты ребра труб на интенсивность теплоотдачи однорядного пучка в режиме свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты. Установлено, что с увеличением высоты ребра труб однорядного пучка интенсивность теплоотдачи, отнесенная к площади поверхности труб по основанию ребер, возрастает в 1,5–3,3 раза для режима свободной конвекции и в 1,7–9 раз для режима свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты. Определено, что интенсивность теплоотдачи однорядного пучка с увеличением угла наклона труб к горизонтальной плоскости снижается в пределах $\gamma = 0-30^\circ$ до 10%, а при установке вытяжной шахты над пучком возрастает в 1,1–2,7 раза [7, 9, 14, 15, 17].

3. Для режимов свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты проведены экспериментальные исследования теплоотдачи биметаллических труб с коэффициентом оребрения $\phi = 21$, собранных в шахматные равносторонние горизонтальные пучки с поперечными и диагональными шагами $S_1 = 0,058, 0,064$ и $0,07$ м ($\sigma_1 = 1,021; 1,13; 1,23$) и числом рядов $z = 1; 2; 4$. Получены обобщающие уравнения для расчета теплоотдачи в виде: $Nu = f(Ra, \chi_{ш})$ с погрешностью от 5 до 18%, $Nu = f(Ra, H_{п-ш})$ – до 5% и $Nu = f(Re, \sigma_1, z)$ – до 7,5% [2, 3, 5, 8].

4. Получены закономерности влияния поперечного шага установки труб на интенсивность теплоотдачи в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты для трубных пучков. Установлено, что

при увеличении поперечного шага труб пучков интенсивность теплоотдачи в режиме свободной конвекции возрастает, а в режиме ее интенсификации максимальное значение теплоотдачи изменяется еще и в зависимости от числа рядов пучка. Определено, что установка над пучком вытяжной шахты позволяет увеличить интенсивность теплоотдачи пучков в 1,1–4,2 раза. При этом с увеличением числа рядов в целом она уменьшается. Изучено влияние геометрических параметров вытяжной шахты на интенсивность теплоотдачи трубных пучков [2, 3, 5, 8].

5. На основе полученных оптимальных параметров пучков биметаллических оребренных труб разработаны следующие рекомендации по проектированию: для ТВО, эксплуатирующихся в режиме свободной конвекции (высота ребра 0,002 м ($\phi = 2,8$); угол наклона к горизонтальной плоскости 0–30°; поперечный шаг труб 0,070 м) [2, 3, 7, 8, 12, 13]; для ТВО с вытяжной шахтой (высота ребра 0,008 м ($\phi = 9,4$); поперечный шаг труб 0,058 м для одно-, 0,064 м для двух- и 0,070 м для четырехрядного пучка; коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка в диапазоне 0,7–1,5; относительная высота системы пучок–шахта для одно-, двух и четырехрядного пучков более 1,14, 0,57 и 0,29 соответственно) [2, 3, 8, 9, 12].

6. Усовершенствована методика теплового расчета ТВО с вытяжной шахтой с учетом разработанных обобщающих уравнений по теплоотдаче и уточненной методики определения лучистой составляющей [2, 3, 5, 8, 18]. С помощью данной методики, а также учетом рекомендаций по проектированию ТВО с вытяжной шахтой проведена оценка его энергетической и экономической эффективности в различных тепловых режимах. Определено, что с ростом поперечного шага установки труб ТВО от 0,058 до 0,070 м удельная экономия электрической энергии в год в режиме свободной конвекции возрастает от 26 до 31% (от 29,2 до 35,4 т у. т. /МВт) по сравнению с режимом вынужденной конвекции, а в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты, от 31 до 36% (от 35,4 до 41,1 т у. т. /МВт) соответственно.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные критериальные зависимости для расчета средних коэффициентов теплоотдачи оребренных пучков в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации, уточненная методика теплового расчета ТВО с вытяжной шахтой, а также рекомендации по проектированию ТВО с вытяжной шахтой и без нее могут быть использованы проектно-конструкторскими институтами и заводами-изготовителями теплообменного оборудования нефтехимического, газового машиностроения, лесной промышленности для проектирования экономичных ТВО и модернизации существующих аппаратов [19, 20].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**Статьи в рецензируемых научных изданиях**

1. Сухоцкий, А. Б. Исследование свободноконвективного теплообмена оребренной трубы и однорядного пучка при различных углах наклона труб к горизонтальной плоскости / А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2019. – № 2. – С. 272–279.

2. Влияние поперечного шага установки труб на теплоотдачу в режиме смешанной конвекции трубных пучков аппаратов воздушного охлаждения / Г. С. Маршалова, А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик, А. Н. Скрипник // Вестник фонда фундаментальных исследований. – 2020. – № 1. – С. 46–53.

3. Сухоцкий, А. Б. Влияние межтрубного шага на конвективную теплоотдачу воздухоохлаждаемого пучка с вытяжной шахтой / А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик, Г. С. Маршалова // Вестник фонда фундаментальных исследований. – 2020. – № 2. – С. 160–169.

4. Данильчик, Е. С. Экспериментальные исследования влияния угла наклона оребренной трубы на свободно-конвективную теплоотдачу теплообменников воздушного охлаждения / Е. С. Данильчик, А. Б. Сухоцкий // Энергоэффективность. – 2020. – № 7. – С. 16–20.

5. Сухоцкий, А. Б. Особенности расчета лучистой составляющей теплового потока горизонтального пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова, Е. С. Данильчик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2020. – Т. 63, № 4. – С. 380–388.

6. Данильчик, Е. С. Экспериментальные исследования теплоотдачи одиночной биметаллической ребристой трубы с различной высотой оребрения к воздуху в режиме свободной конвекции / Е. С. Данильчик // Тепло- и массоперенос – 2019 : сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова ; редкол.: О. Г. Пенязков (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 42–52.

7. Данильчик, Е. С. Экспериментальные исследования эффективности однорядного пучка из биметаллических оребренных труб с различной высотой оребрения при свободно-конвективном теплообмене с воздухом / Е. С. Данильчик, А. Б. Сухоцкий, В. Б. Кунтыш // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 5. – С. 128–141.

8. Экспериментальное исследование свободно-конвективного теплообмена воздухоохлаждаемых пучков оребренных труб, интенсифицированного вытяжной шахтой / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова, С. В. Здитовецкая, Е. С. Данильчик // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2021. – № 4. – С. 8–12.

9. Сухоцкий, А. Б. Конвективная теплоотдача однорядных пучков из труб с накатными алюминиевыми ребрами различной высоты при малых числах

Рейнольдса / А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2021. – Т. 64, № 4. – С. 336–348.

Статьи в сборниках трудов и материалы конференций

10. Сухоцкий, А. Б. Исследование влияния угла наклона оребренной трубы и однорядного пучка на свободно-конвективный теплообмен [Электронный ресурс] / А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик // Химическая технология и техника : материалы докладов 83-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 4–14 февраля 2019 г. / УО БГТУ ; отв. за изд. И. В. Войтов. – Минск, 2019. – Режим доступа: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/30253>. – Дата доступа: 14.09.2020.

11. Сухоцкий, А. Б. Исследование влияния угла наклона круглоребристой трубы и однорядного пучка на свободно-конвективный теплообмен [Электронный ресурс] / А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик // Материалы Международной науч.-практ. конф. «Информационные технологии в политических, социально-экономических, правовых и технических системах», Минск, 24 апреля 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. ; сост. В. Л. Червинский. – Минск, 2019. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/55570>. – Дата доступа: 14.09.2020.

12. Данильчик, Е. С. Интенсификация свободно-конвективной теплоотдачи круглоребристой трубы и однорядного пучка из этих труб с различной высотой оребрения / Е. С. Данильчик // Международная молодежная научная конференция «XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых)» : материалы конференции. Сборник докладов, Казань, 7–8 ноября 2019 г. : в 6 т. / КНИТУ-КАИ. – Казань, 2019. – Т. 1. – С. 205–211.

13. Сухоцкий, А. Б. Экспериментальные исследования свободно-конвективной теплоотдачи однорядного пучка из круглоребристых труб с различной высотой оребрения / А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик // Интеграция и развитие научно-технического и образовательного сотрудничества – взгляд в будущее : сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения – 2019», Минск, 11–12 декабря 2019 г. : в 3 т. / Белорус. гос. техн. ун-т. – Минск, 2020. – Т. 2. – С. 52–55.

14. Сухоцкий, А. Б. Исследования влияния вытяжной шахты на свободно-конвективной теплообмен однорядного пучка из круглоребристых труб с различной высотой оребрения / А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик // Интеграция и развитие научно-технического и образовательного сотрудничества – взгляд в будущее : сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения – 2019», Минск, 11–12 декабря 2019 г. : в 3 т. / Белорус. гос. техн. ун-т. – Минск, 2020. – С. 55–58.

15. Сухоцкий, А. Б. Интенсификация свободно-конвективной теплоотдачи однорядного пучка из круглоребристых труб с различной высотой оребрения в потоке воздуха [Электронный ресурс] / А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик // Химическая технология и техника : материалы докл. 84-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, научн. сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 3–14 февраля 2020 г. / УО БГТУ ; отв. за изд. И. В. Войтов. – Минск, 2020. – Режим доступа: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/34934>. – Дата доступа: 14.09.2020.

16. Данильчик, Е. С. Влияние угла наклона трубы с винтовым оребрением различной высоты на свободно-конвективный теплообмен [Электронный ресурс] / Е. С. Данильчик, А. Б. Сухоцкий // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Информационные технологии в политических, социально-экономических, правовых и технических системах», Минск, 22 апреля 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. ; редкол.: Г. М. Бровка (пред. редкол.) [и др.] ; сост. В. Л. Червинский. – Минск, 2020. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/76615>. – Дата доступа: 14.09.2020.

17. Сухоцкий, А. Б. Экспериментальные исследования свободно-конвективного теплообмена однорядного пучка из ребристых труб с различной высотой оребрения расположенных под разными углами к горизонту / А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик // Инновационное развитие нефтегазовой отрасли, современная энергетика и их актуальные проблемы : материалы междунар. конф., Ташкент, 26 мая 2020 г. / Ташкентский химико-технологический институт. – Ташкент, 2020. – С. 823–824.

18. Данильчик, Е. С. Исследования конвективной теплоотдачи однорядных пучков из труб с круглыми алюминиевыми ребрами разной высоты в различных режимах свободной конвекции [Электронный ресурс] / Е. С. Данильчик, А. Б. Сухоцкий // Информационные технологии в политических, социально-экономических, правовых и технических системах : Материалы международной науч.-практ. конф., Минск, 22 апреля 2021 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. ; редкол.: Г. М. Бровка (пред. редкол.) [и др.] ; сост. В. Л. Червинский. – Минск, 2021. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/76615>. – Дата доступа: 01.08.2021.

Патенты

19. Аппарат воздушного охлаждения с вытяжной шахтой : полез. модель ВУ 12163 / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова, Е. С. Данильчик. – Оpubл. 30.12.2019.

20. Аппарат воздушного охлаждения с вытяжной шахтой : полез. модель ВУ 12477 / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова, Е. С. Данильчик. – Оpubл. 30.12.2020.

РЕЗЮМЕ

Данильчик Екатерина Сергеевна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Ключевые слова: теплообменник воздушного охлаждения (ТВО), свободная конвекция, теплоотдача, оптимизация, оребренный пучок, высота ребра трубы, поперечный шаг труб, число Нуссельта, число Релея, число Рейнольдса.

Объект диссертационного исследования: шахматный пучок биметаллических оребренных труб, применяемый в ТВО.

Предмет исследования: процессы теплообмена при обтекании шахматного пучка оребренных труб в режимах свободной конвекции воздуха и при ее интенсификации.

Цель исследования: повышение эффективности ТВО путем оптимизации высоты ребра труб и поперечного шага их установки в теплообменных секциях аппарата в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации, позволяющих экономить электрическую энергию.

Полученные результаты. Методом полного теплового моделирования получены обобщающие уравнения подобия для расчета теплоотдачи пучков биметаллических оребренных труб, учитывающие влияние высоты ребра труб, угла наклона труб к горизонтальной плоскости, поперечного шага их установки и числа рядов в режиме свободной конвекции. Получены уравнения, учитывающие влияние высоты ребра труб, поперечного шага их установки, геометрических параметров вытяжной шахты и числа рядов в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты. На основе анализа полученных закономерностей предложены рекомендации по проектированию ТВО с вытяжной шахтой и без нее. Усовершенствована методика теплового расчета ТВО с вытяжной шахтой с учетом обобщающих уравнений по теплоотдаче и уточненной методики определения лучистой составляющей.

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

РЭЗІЮМЕ

Данільчык Кацярына Сяргееўна

ПАВЫШЭННЕ ЭФЕКТЫЎНАСЦІ ЦЕПЛААБМЕННІКАЎ ПАВЕТРАНАГА АСТУДЖЭННЯ ПРЫ ВОЛЬНА-КАНВЕКТЫЎНЫМ ЦЕПЛААБМЕНЕ

Ключавыя словы: цеплаабменнік паветранага астуджэння (ЦПА), вольная канвекцыя, цеплааддача, аптымізацыя, рабрысты пучок, вышыня рабра трубы, папярочны крок труб, лік Нуссэльта, лік Рэлея, лік Рэйнальдса.

Аб’ект дысертацыйнага даследавання: шахматны пучок біметалічных рабрыстых труб, які ўжываецца ў ЦПА.

Прадмет даследавання: працэсы цеплаабмену пры абцяканні шахматнага пучка рабрыстых труб у рэжымах вольнай канвекцыі паветра і пры яе інтэнсіфікацыі.

Мэта даследавання: павышэнне эфектыўнасці ЦПА шляхам аптымізацыі вышыні рабра труб і папярочнага кроку іх ўсталеўкі ў цеплаабменных секцыях апарата ў рэжымах вольнай канвекцыі і пры яе інтэнсіфікацыі, якія дазваляюць эканоміць электрычную энергію.

Атрыманыя вынікі. Метадам поўнага цеплавога мадэлявання атрыманы абагульняючыя ўраўненні падабенства для разліку цеплааддачы пучкоў біметалічных рабрыстых труб, якія ўлічваюць уплыў вышыні рабра труб, кута нахілу труб да гарызантальнай плоскасці, папярочнага кроку іх усталеўкі і колькасці шэрагаў у рэжыме вольнай канвекцыі. Атрыманы ўраўненні, якія ўлічваюць уплыў вышыні рабра труб, папярочнага кроку іх устанаўлення, геаметрычных параметраў выцяжной шахты і колькасці шэрагаў у рэжыме вольнай канвекцыі, інтэнсіфікаванай з дапамогай выцяжной шахты. На аснове аналізу атрыманых заканамернасцяў прапанаваны рэкамендацыі па праектаванні ЦПА з выцяжной шахтай і без яе. Удасканалена метадыка цеплавога разліку ЦПА з выцяжной шахтай з улікам абагульняючых ураўненняў па цеплааддачы і ўдакладненай метадыкі вызначэння прамяністага складніку.

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

SUMMARY

Danilchik Ekaterina Sergeevna

INCREASING THE EFFICIENCY OF AIR COOLED HEAT EXCHANGERS
WITH A FREE CONVECTION HEAT EXCHANGE

Keywords: air-cooled heat exchanger (ACHE), free convection, heat transfer, optimization, finned bundle, tube fin height, transverse tube pitch, Nusselt number, Rayleigh number, Reynolds number.

Object of research: staggered finned bimetallic tube bundles used in ACHE.

Subject of research: heat transfer processes past a staggered bundle of finned tubes in free convection mode and during its intensification.

The purpose of research: increasing the efficiency of ACHE by optimizing the height of the tube fins and the transverse pitch of their arrangement in the heat-exchange sections of the apparatus under conditions of free convection and during its intensification, which allow saving electric energy.

The results obtained. Using the method of complete thermal modeling, the generalizing similarity equations of average heat transfer of finned bimetallic tube bundle are obtained, taking into account the influence of the tube fin height, the angle of inclination of the tubes to the horizontal plane, the transverse pitch of their arrangement and a number of rows under conditions of free convection. Equations are obtained, taking into account the influence of the tube fin height, the transverse pitch of their arrangement, the exhaust shaft geometric parameters and a number of rows under conditions of free convection, intensified with the help of the exhaust shaft. Based on the analysis of the regularities obtained, recommendations for the design of ACHE with and without an exhaust shaft are proposed. The method of thermal calculation of ACHE with an exhaust shaft has been improved, taking into account the generalizing equations for heat transfer and a refined method for determining the radiant component.

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



Научное издание

Данильчик Екатерина Сергеевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕПЛООБМЕННИКОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
ПРИ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Подписано в печать 24.03.2022.

Формат 60×84 1/16. Бумага офисная.

Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 1,74. Уч.-изд. л. 1,71.

Тираж 80 экз. Заказ 4.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси.

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/275 от 04.04.2014.

ЛП № 02330/451 от 18.12.2013.

ул. П. Бровки, 15, 220072, г. Минск