

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт: Электронного обучения
Специальность: 140404 Атомные электрические станции и установки
Кафедра: Атомных и тепловых электростанций

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

Тема работы
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ ОТ ПУЧКА ТРУБ

УДК 621.311.25:621.039.002.5:621.1 - 462

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-6191	Курганов Сергей Юрьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры АТЭС	Ю.Я. Раков	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры менеджмента	С.И. Сергейчик	к.т.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	А.М. Плахов	к.т.н., доцент		

По разделу «Автоматизация технологических процессов и производств»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов	Е.В. Иванова	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
атомных и тепловых электростанций	А.С. Матвеев	к.т.н., доцент		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Электронного обучения
Специальность подготовки **140404 Атомные электрические станции и установки**
Кафедра «Атомных и тепловых электростанций»

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой АТЭС ЭНИН
А.С. Матвеев

(Подпись) _____
(Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

дипломного проекта
(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
3-6191	Курганову Сергею Юрьевичу

Тема работы:

Экспериментальный стенд для исследования теплоотдачи от пучка труб	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 9612/с от 09.12.2015

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15 января 2016 года
--	----------------------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Целью обзора является сбор и обобщение информации о процессах теплообмена от пучка труб при свободной и вынужденной конвекции. Объектом исследования в работе является разработка экспериментального лабораторного стенда для исследования теплоотдачи от пучка горизонтальных труб в воздушной среде и получение расчетных формул, используемых при проектировании теплообменных аппаратов.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none">1. Аналитический обзор литературы по заданной тематике2. Разновидности конвективных теплообменов3. Исследование теплоотдачи при вынужденной конвекции4. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции5. Расчет допустимых электрических параметров нагревателей6. Описание критериальных зависимостей, полученных в ходе эксперимента

	7. Разработка схемы автоматизированного контроля температуры опытного участка.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Компоновочный чертеж стенда Чертеж общего вида опытного участка стенда
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Сергейчик С.И., доцент кафедры менеджмента
Социальная ответственность	Плахов А.М., доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности
Автоматизация технологических процессов	Иванова Е.В., доцент кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10 июня 2015 года
---	--------------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АТЭС	Раков Ю.Я.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-6191	Курганов Сергей Юрьевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
3-6191	Курганов Сергей Юрьевич

Институт	ИНЭО	Кафедра	АТЭС
Уровень образования	инженер	Направление/специальность	Атомные электрические станции и установки

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Разработка устава научно-технического проекта</i>
<i>3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, организация закупок</i>
<i>4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
-	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Сергейчик С.И.	к. т. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-6191	Курганов С.Ю.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-6191	Курганов Сергей Юрьевич

Институт	ИНЭО	Кафедра	АТЭС
Уровень образования	инженер	Направление/специальность	Атомные электрические станции и установки

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p><i>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p><i>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p> <p>- вредных проявлений факторов производственной среды (освещение, шумы, вибрации)</p>
<p><i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p><i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 	<p>-действие фактора на организм человека (шумы, освещение)</p>
<p><i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения) 	<p>-механические опасности -электробезопасность пожарная безопасность</p>
<p><i>3. Охрана окружающей среды:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране 	

<i>окружающей среды.</i>	
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий 	
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны 	
Перечень графического материала:	
<i>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</i>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Плахов А.М.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-6191	Курганов С.Ю.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 77 с., 17 рисунков, 13 источников, 6 приложений.

Ключевые слова: ТЕПЛООТДАЧА, КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ, ПУЧОК ТРУБ, ТЕПЛООБМЕН, СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ, ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ, ТРУБНЫЙ ПУЧОК

Объектом исследования являются измерения на экспериментальном стенде.

Цель работы сконструировать установку для исследования теплоотдачи от трубного пучка при вынужденной и естественной конвекции.

В процессе работы проводилось изучение монограмм, журнальных статей и других источников по данной теме.

В ходе исследований был получен коэффициент теплоотдачи, произведено нахождение критериальных зависимостей для экспериментальной установки и получен сравнительный анализ результатов с литературными данными.

Создание новых лабораторных установок, отвечающих всем требованиям, является одним из приоритетных направлений развития кафедры АТЭС

В будущем планируется проведение лабораторных работы для изучения дисциплины «Тепломассообмен в энергетическом оборудовании» для студентов, обучающихся по направлению «Теплоэнергетика».

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе MicrosoftWord 2007, диаграммы построены в книге MicrosoftExcel 2007, рисунки выполнены с помощью программы CorelDRAWX5, редактор формул MathType 6.0.,

									Лист
									7
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	ФЮРА. 311600. 001 ПЗ				

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями.

теплоотдача: Процесс конвективного теплообмена между движущейся средой и поверхностью её раздела с другой средой - твёрдым телом, жидкостью или газом

теплопередача: Процесс теплообмена между двумя средами через разделяющую их твердую стенку или через поверхность раздела между ними.

коэффициент теплоотдачи: Величина, характеризующая интенсивность отдачи тепла; определяется отношением плотности теплового потока, отдаваемого поверхностью, к разности температур между поверхностью и прилегающей средой

плотность теплового потока: Количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности.

конвекция: Вид теплопередачи, при котором внутренняя энергия передается струями и потоками

естественная конвекция: Вид теплопередачи, которая характеризуется движением отдельных частиц теплоносителя, возникающим вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц

вынужденная конвекция: Конвективный теплообмен, возникающий при движении жидкости под действием внешних сил, создаваемых с помощью насосов, компрессоров, вентиляторов и т.д.

Nu - критерий Нуссельта;

Gr - критерий Грасгофа;

Pr - критерий Прандтля;

Re - критерий Рейнольдса;

α - коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К;

λ - теплопроводность, Вт / (м · К);

ν - коэффициент кинематической вязкости м²/с;

T - температура, К;

									Лист
									8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА. 311600. 001 ПЗ				

Q - тепловой поток, $Вт$;

U - напряжение электрического тока, $В$;

ρ - плотность, $кг/м^3$;

q - плотность теплового потока, $Вт / м^2$;

σ - постоянная Стефана-Больцмана, $5,67 \cdot 10^{-8} Вт \cdot (м \cdot К^4)$;

ε - степень черноты;

x, y, z - декартовы системы координат;

i, j, k - орты декартовой системы координат.

					<i>ФЮРА. 311600. 001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

ВВЕДЕНИЕ	
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	12
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	13
1.2 Гидродинамика и теплообмен пучка труб	14
1.2.1 Теплоотдача от пучка труб в условиях свободной конвекции	15
1.2.2 Теплоотдача от пучка труб в условиях вынужденной конвекции	17
2. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЯ	22
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ПОТОКА	24
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ	26
4.1 Описание экспериментальной установки	35
5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ	38
5.1 Описание экспериментальной установки	47
6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	49
6.1 Исследование теплоотдачи от пучка труб при вынужденной конвекции	49
6.2 Исследование теплоотдачи от пучка труб при естественной конвекции	53
7. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	56
7.1 Экономические цели	56
7.2 График выполнения работ по реализации методики изучения коэффициента теплоотдачи	56
7.3 Расчет стоимости установки	59
7.3.1 Расчет полной заработной платы	60
7.3.2 Расчет отчислений от заработной платы	61
7.3.3 Расчет затрат на электроэнергию	61

7.3.4 Расчет общей себестоимости разработки	62
7.3.5 НДС	63
7.3.6 Полная смета затрат на выполнение НИР	63
8. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	64
8.1 Описание рабочего места	64
8.2 Производственная санитария	65
8.3 Техника безопасности	71
8.4 Охрана окружающей среды	74
9 АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ОПЫТНОГО УЧАСТКА	75
9.1 Краткое описание технологической схемы объекта контроля	75
9.2 Методы и средства измерения температуры	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	78
Список используемых источников	79
Приложение А Данные исследования вынужденной конвекции	
Приложение Б Данные исследования естественной конвекции	
Приложение В ФЮРА.311600.002 ОВ Опытный участок. Чертеж общего вида	
Приложение Г ФЮРА.311600.004 МЧ Экспериментальный стенд. Монтажный чертеж	
Приложение Д ФЮРА.421000.003 С2 АСК температуры. Функциональная схема	
Приложение Е ФЮРА.421000.003 С01 АСК температуры. Заказная спецификация приборов.	

ВВЕДЕНИЕ

Процессы переноса тепла и массы играют исключительно важную роль в природе и современной технике. Среди них заметное место занимают естественная и вынужденная конвекции. На практике наибольший интерес представляет конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела и омывающей его средой. С ростом энергетических мощностей и объемов производства все более увеличиваются габариты применяемых теплообменных аппаратов. Создание более эффективных и компактных теплообменников должно обеспечить значительную экономию топлива, металлов и затрат труда в атомной промышленности, теплоэнергетике, нефтеперерабатывающей, химической и других отраслях производства.

Одним из основных типов теплообменных поверхностей являются цилиндрические тела. При свободной конвекции их горизонтальная ориентация, как правило, более выгодна. Опубликованные в литературе данные позволяют в полной мере описать физические процессы при свободно и вынужденном конвективном обтекании цилиндрических тел, особенно в случае взаимодействия теплообменных поверхностей, входящих в состав трубного пучка.

Проведение экспериментальных исследований и лабораторных работ по курсу «ТМО в энергетическом оборудовании» является одним из инструментов для закрепления и углубления знаний, полученных из теоретического курса. Навыки, приобретенные «через руки» помогают в полном объеме получить широкое представление о тепломассообмене.

Невысокие коэффициенты теплоотдачи при свободной конвекции вызывают необходимость применения различных методов интенсификации. В конкретных обстоятельствах могут иметь значение стоимость, вес, сложность конструкции и другие факторы, связанные с методом. Поэтому необходимо исследовать всевозможные подходы. Интенсификация процессов теплообмена аппаратов энергетического оборудования АЭС и ТЭС является эффективным способом уменьшения их габаритов и металлоемкости.

										Лист
										12
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата	ФЮРА. 311600. 001 ПЗ					

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вследствие простоты изготовления и монтажа тепловые поверхности в большинстве случаев выполняются из труб. Поэтому, разрабатывая проблемы теплообмена, внимание следует уделить внешней теплоотдаче трубчатых поверхностей. Применение газообразных теплоносителей в ядерных реакторах в первую очередь потребовало детального изучения пучков труб в потоке газа. Этому вопросу в течение длительного промежутка времени было посвящено много работ. Большинство экспериментов проводилось в потоке воздуха.

Уже первые исследования [1] показали, что теплоотдача последующих рядов труб выше, чем теплоотдача первого ряда, было определено влияние геометрических параметров пучков на теплообмен. В дальнейшем были развиты более детальные исследования. Изучалось влияние типа пучка, а также относительного поперечного ($a = s_1/d$) и продольного ($b = s_2/d$) шагов на интенсивность теплоотдачи [3]. Большинство экспериментальных исследований показало, что теплоотдача трубки в пучке больше теплоотдачи одиночной трубки и зависит от шагов s_1 и s_2 .

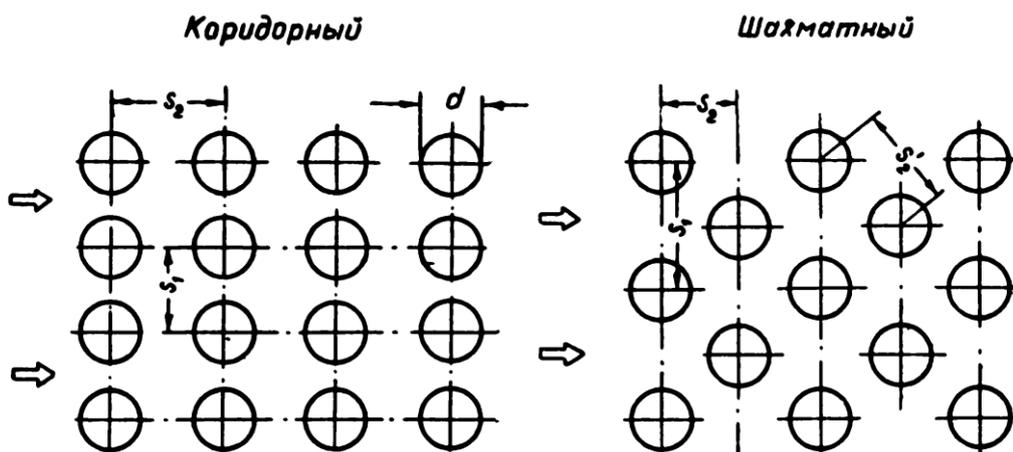


Рисунок 1 - Схема расположения труб в пучке [3]

С развитием теории подобия экспериментальные результаты обобщались согласно этой теории и выражались критериальной формулой следующего вида:

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докцм.	Подпись	Дата		13

При малых числах Re основной поток в пучке является ламинарным с крупномасштабными вихрями в циркуляционных зонах. Течение в пограничном слое на трубке является ламинарным. Кормовая часть при этом обтекается циркуляционным потоком. Такое обтекание труб, имеющее место при числах $Re < 10^3$, можно охарактеризовать как преобладающее ламинарное обтекание.

С дальнейшим ростом чисел Re происходит значительное изменение течения в пучке. Поток в межтрубном пространстве становится вихреобразным с повышенной турбулентностью. Хотя лобовая часть трубки находится под воздействием турбулентности, на ней все же развивается ламинарный пограничный слой, такое обтекание можно считать смешанным.

Обтекание по числу Re можно разделить на следующие диапазоны: диапазон преобладающего ламинарного обтекания - $Re < 10^3$, смешанного - $5 \cdot 10^2 < Re < 2 \cdot 10^5$ и преобладающего турбулентного - $Re > 2 \cdot 10^5$.

1.2.1 Теплоотдача от пучка труб в условиях свободной конвекции

Явление свободной конвекции возникает под воздействием неравномерного распределения плотностей теплоносителя из-за различия температур.

Геометрически система определяется диаметром труб d , продольным s_1 и s_2 шагами. С точки зрения свободно-конвективной теплопередачи наиболее эффективно горизонтальное расположение труб в пучке. Условия обтекания первого ряда близки к течению около одиночного цилиндра [7].

Обработка дифференциальных уравнений, описывающих явление методами теории подобия, приводит к зависимости:

$$Nu = f\left(Gr; Pr; \frac{s_1}{d}; \frac{s_2}{d}\right)$$

Детальному исследованию свободной конвекции от трубного пучка посвящены работы Короленко Ю. А. [6].

									Лист
									15
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	ФЮРА. 311600. 001 ПЗ				

Число Нуссельта Nu характеризует безразмерный коэффициент теплоотдачи.

Число Грасгофа Gr характеризует интенсивность свободного движения жидкости, представляет собой отношение подъемной силы, возникающей вследствие теплового расширения жидкости, к силам вязкостного трения.

Число Прандтля Pr характеризует влияние свойств жидкости на интенсивность теплообмена.

Число Рейнольдса Re характеризует интенсивность вынужденного движения жидкости, представляет собой отношение сил инерции (скоростного напора) к силам вязкостного трения.

Nu

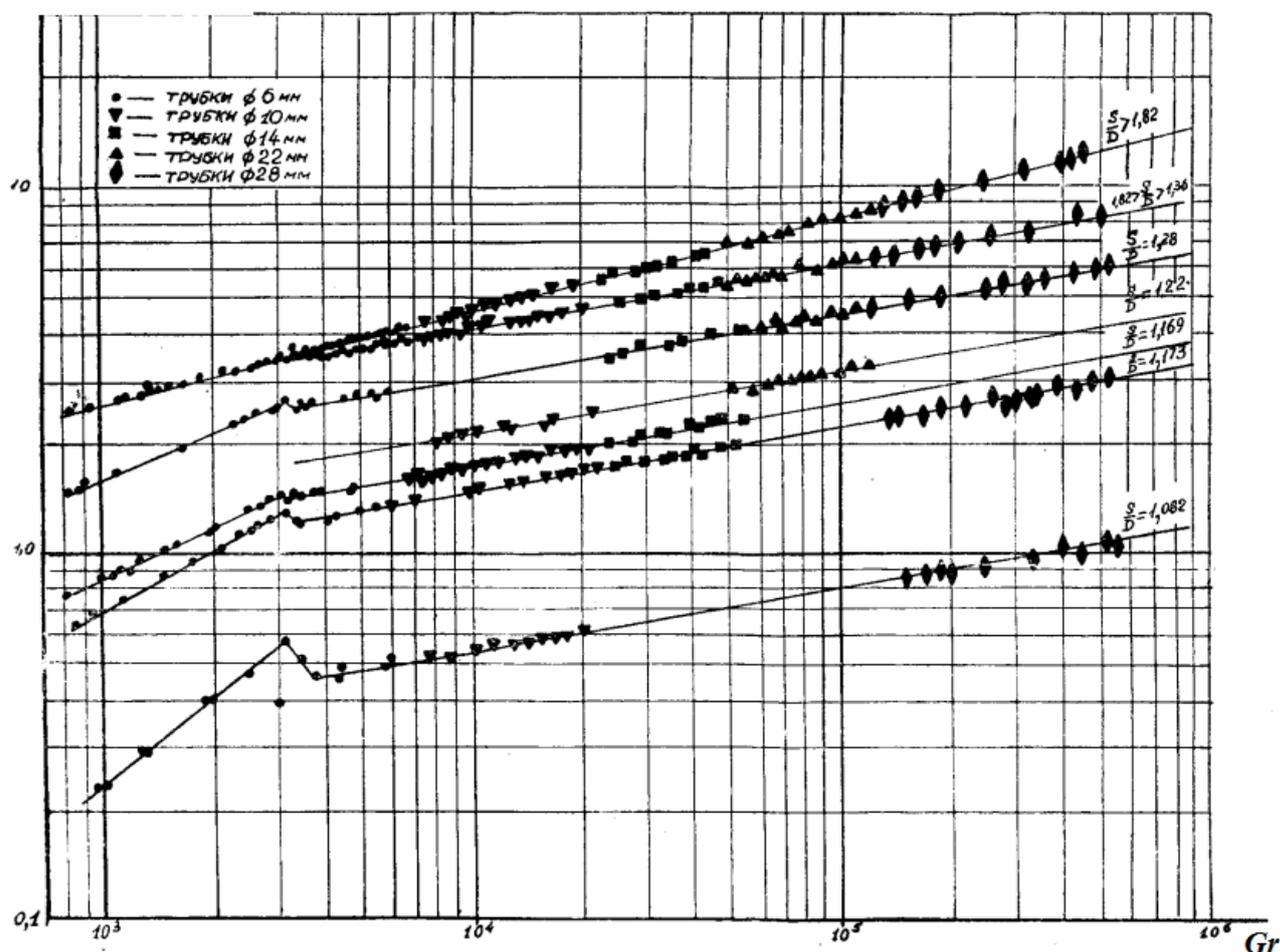


Рисунок 3 - Зависимость критерия Нуссельта от числа Грасгофа [7]

Из рисунка 3 видно, что при малых значениях относительного шага влияние соседних труб на теплоотдачу конвекцией ощущается во всех

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ФЮРА. 311600. 001 ПЗ

Лист

16

значениях чисел Грасгофа, что существенно уменьшает коэффициент теплоотдачи (критерий Нуссельта) по сравнению с одиночной трубой при тех же значениях Gr . При $1,36 \leq s_1/d \leq 1,82$ влияние соседних труб друг на друга ощущается лишь при $Gr > 3200$. При этом влияние относительного шага на коэффициент теплоотдачи исчезает. При $s_1/d > 1,82$ влияние соседних стержней друг на друга прекращается, и процесс теплоотдачи развивается по законам свободной конвекции одиночных стержней в неограниченном объеме.

При формировании коридорного трубного пучка при шаге $s_1/d < 2,0$ и $s_2/d < 2,0$ (тесный пучок) внутренние трубки пучка резко перегреваются по сравнению с трубками, расположенными по поверхности пучка. Теплоотдача от внутренних трубок тесного пучка практически отсутствует. При пучках с $s_1/d \geq 2,0$ и $s_2/d \geq 2,0$ коэффициент теплоотдачи (Nu) в одинаковой степени зависит от значения s_1/d и s_2/d , что позволяет учитывать их влияние на теплоотдачу совместно:

$$Nu = C \cdot \left(\frac{s_1}{d} \cdot \frac{s_2}{d} \right)^k \cdot Gr^m;$$

Для шахматного трубного пучка шаг s_2/d слабо влияет на коэффициент теплоотдачи и в расчетах может не учитываться. Тогда критериальное уравнение примет вид:

$$Nu = C \cdot \left(\frac{s_1}{d} \right)^{0,37} \cdot Gr^{0,25}.$$

Таким образом, на основании проведенного выше обзора работ по естественной конвекции можно сделать вывод, что данный вопрос изучен в широком диапазоне определяющих параметров. Данные разных авторов хорошо согласуются между собой, и могут быть использованы для проведения тестовых расчетов теплоотдачи от пучка труб в условиях свободной конвекции.

1.2.2 Теплоотдача от пучка труб в условиях вынужденной конвекции

Интенсивность теплоотдачи трубы в пучке значительно больше, чем при

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата		

установившемся течении в канале, что связано с малой толщиной пограничного слоя на поверхности трубы в пучке и большой турбулентностью потока в межтрубном пространстве. Теплоотдача трубы в пучке зависит главным образом от скорости потока, расположения труб, свойств набегающей среды, тепловой нагрузки и направления теплового потока. В безразмерном виде эта связь имеет следующий вид:

$$Nu = f \left(Re, Pr, \frac{\mu_f}{\mu_w}, \frac{\lambda_f}{\lambda_w}, \frac{c_f}{c_w}, \frac{\rho_f}{\rho_w}, \frac{s_1}{d}, \frac{s_2}{d} \right);$$

За характерный размер принимается диаметр трубы, а за расчетную скорость – скорость потока в минимальном проходном сечении. При обтекании одиночной трубы потоком бесконечных размеров, трубы в канале и трубы в первом ряду пучков при разных расчетных скоростях, определенных в поперечном сечении по оси трубы, получаются различные скорость и теплоотдача на лобовой части. Поэтому рационально ввести понятие осредненной скорости.

Рассмотрение теплоотдачи по осредненной скорости в зоне преобладающего ламинарного обтекания показало, что теплоотдача первых рядов труб в различных пучках совпадает с теплоотдачей одиночной трубы. Изучение же теплоотдачи глубинных рядов трубок привело к выводу, что разница в интенсивности теплоотдачи обусловлена влиянием на нее завихренности потока.

Анализ данных, полученных при больших числах Re показал, что для расчета теплоотдачи обычных пучков труб можно использовать максимальную скорость, которая незначительно отличается от осредненной. Исключение составляют тесные пучки труб, в которых осредненная скорость того же порядка, что и набегающая [2].

Для трубы в пучке характерны те же закономерности местной теплоотдачи, что и для одиночной трубы. Распределение теплоотдачи по поверхности определяется особенностями обтекания трубы в пучке, которые во многом зависят от его конфигурации. Например, на трубе в коридорных пучках

										Лист
										18
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	ФЮРА. 311600. 001 ПЗ					

коридорного расположения тождественен.

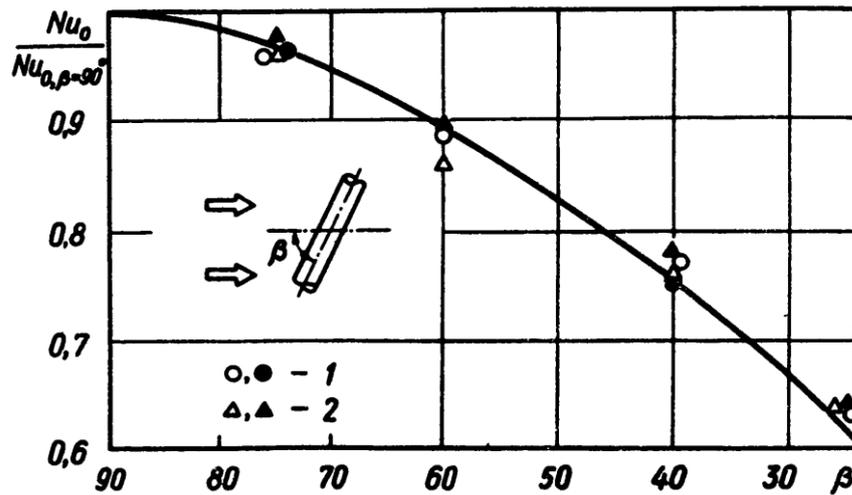


Рисунок 5 - Влияние угла атаки на теплоотдачу трубы в шахматном (1) и коридорном (2) пучках. Светлые и темные символы – первый и глубинный ряды соответственно. [5]

Наиболее простой метод интенсификации теплообмена – это увеличение скорости потока, набегающего на теплообменную поверхность. Данные по исследованию местной теплоотдачи трубы в поперечно обтекаемых потоком пучках гладких труб показывают (рисунок 6), что с увеличением скорости потока, а, соответственно и числа Re , значительно возрастает коэффициент теплоотдачи по периметру трубы, причем максимальные его значения достигаются при $Re = 1,52 \cdot 10^6$ в глубинном ряду шахматного пучка.

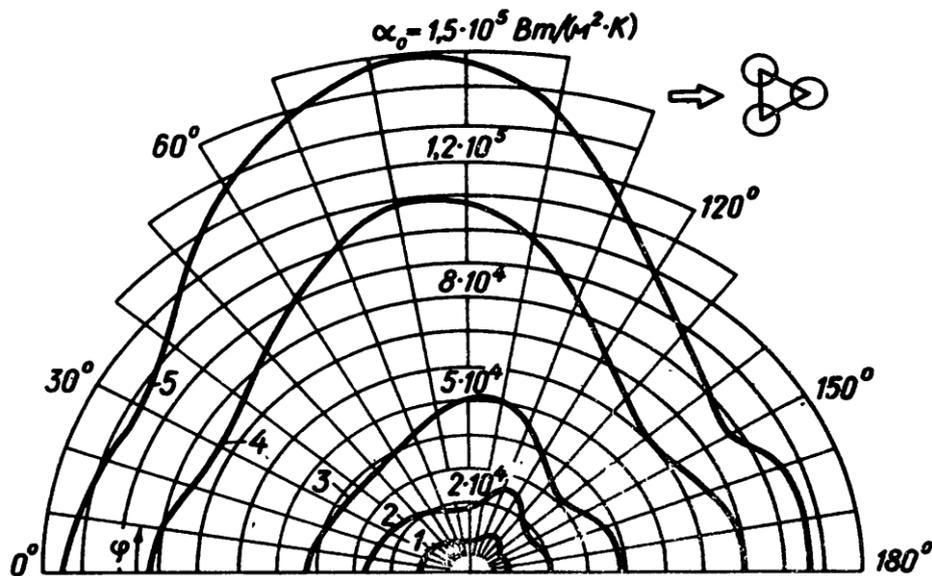


Рисунок 6 - Данные по местной теплоотдаче гладкой трубы в глубинном ряду

шахматного пучка при разных числа Re . 1 – $Re = 6,05 \cdot 10^4$,
 2 – $Re = 2,09 \cdot 10^5$, 3 – $Re = 5,68 \cdot 10^5$, 4 – $Re = 1,16 \cdot 10^6$,
 5 – $Re = 1,52 \cdot 10^6$ [5]

При проведении практических расчетов [12] целесообразно находить средний коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ первого ряда путем умножения $\bar{\alpha}$ третьего ряда на 0,6, второго ряда на 0,7 (шахматное расположение) и на 0,9 (коридорное расположение).

Путем обобщения экспериментальных данных для пучков труб (третий ряд и далее) М.А. Михеевым[8] получены следующие формулы:

для коридорного расположения пучков труб при $Re > 1 \cdot 10^3$

$$Nu_f = 0,22 \cdot Re_f^{0,65} \cdot Pr_f^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25},$$

для шахматного расположения пучков труб при $Re > 1 \cdot 10^3$

$$Nu_f = 0,40 \cdot Re_f^{0,60} \cdot Pr_f^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}.$$

На основе приведенного выше обзора можно сделать вывод, что гидродинамика и теплообмен при вынужденном омывании пучка труб неограниченным однородным потоком исследованы в полной мере в широком диапазоне определяющих параметров. Данные разных авторов хорошо согласуются между собой, и могут быть использованы для проведения расчетов теплоотдачи от пучка труб при вынужденной конвекции.

2 РАСЧЕТ МОЩНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЯ

Для определения напряжения, прикладываемого к нагревателям, необходимо рассчитать их мощность.

$$Q = \frac{U_{\text{нагр}}^2}{R},$$

где U - напряжение на нагревателе

R - сопротивление нагревателя

С другой стороны имеем:

$$Q = \alpha(t_c - t_0)F,$$

где t_c - температура стенки образца

t_0 - температура окружающей среды

F - площадь боковой поверхности цилиндра;

$$F = \pi \cdot d \cdot l = 3,14 \cdot 0,025 \cdot 0,28 = 0,022 \text{ м}^2,$$

$$U_{\text{нагр}} = \sqrt{Q \cdot R} = \sqrt{\alpha(t_c - t_0)F \cdot R}.$$

Для определения коэффициента теплоотдачи требуется нахождение критерия Нуссельта.

$$Nu = 0,5Ra^{0,25},$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \beta d^3 \Delta T}{\nu^2} \cdot \frac{\nu}{a},$$

Ra - число Рэлея;

где g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$

d - характерный размер, м

ΔT - разность температур между стенками жидкости;

ν - кинематическая вязкость жидкости;

a - коэффициент температуропроводности;

β - коэффициент теплового расширения жидкости $\beta = \frac{1}{T}$.

Во время проведения экспериментов температура поверхности нагрева

									Лист
									22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА. 311600. 001 ПЗ				

не должна превышать $T_{II} \leq 100$ °C, в противном случае возможен расплав оловянно-свцового припоя. Принимаем эту температуру за расчетную.

$$\Delta T = T_{II} - T_C = 80 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta d^3 \Delta T}{\nu^2} \cdot \frac{\nu}{a} = \frac{9,8 \cdot 80 \cdot (0,025)^3}{290 \cdot (15 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0,7 = 188000;$$

$$Nu = 0,5 Ra^{0,25} = 0,5 \cdot (188000)^{0,25} = 10,4;$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot d}{\lambda_{\text{воз}}} = \frac{10,4 \cdot 0,025}{0,0263} = 10;$$

$$U_{\text{нагр}} = \sqrt{\alpha(t_c - t_0)F \cdot R} = \sqrt{10 \cdot (100 - 20) \cdot 0,022 \cdot 20} = 21,9 \text{ В}.$$

В результате расчета было определено максимальное безопасное напряжение, которое можно подвести к нагревателям без ущерба функциональности стенда.

					<i>ФЮРА. 311600. 001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докцм.	Подпись	Дата		23

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ПОТОКА

При изучении распределения скоростей в пучках труб в первую очередь необходимо иметь в виду влияние поперечного шага. Интенсивность роста скорости в проходном сечении в основном зависит от величины поперечного шага и с его уменьшением сильно возрастает.

Среднюю скорость в наименьшем проходном сечении ряда труб в зависимости от поперечного шага пучка при постоянстве расхода можно определить по формуле:

$$\bar{w} = w_0 \cdot \frac{a}{a-1},$$

где w_0 - скорость потока, м/с;

a - относительный поперечный шаг решетки $a = \frac{s_1}{d}$.

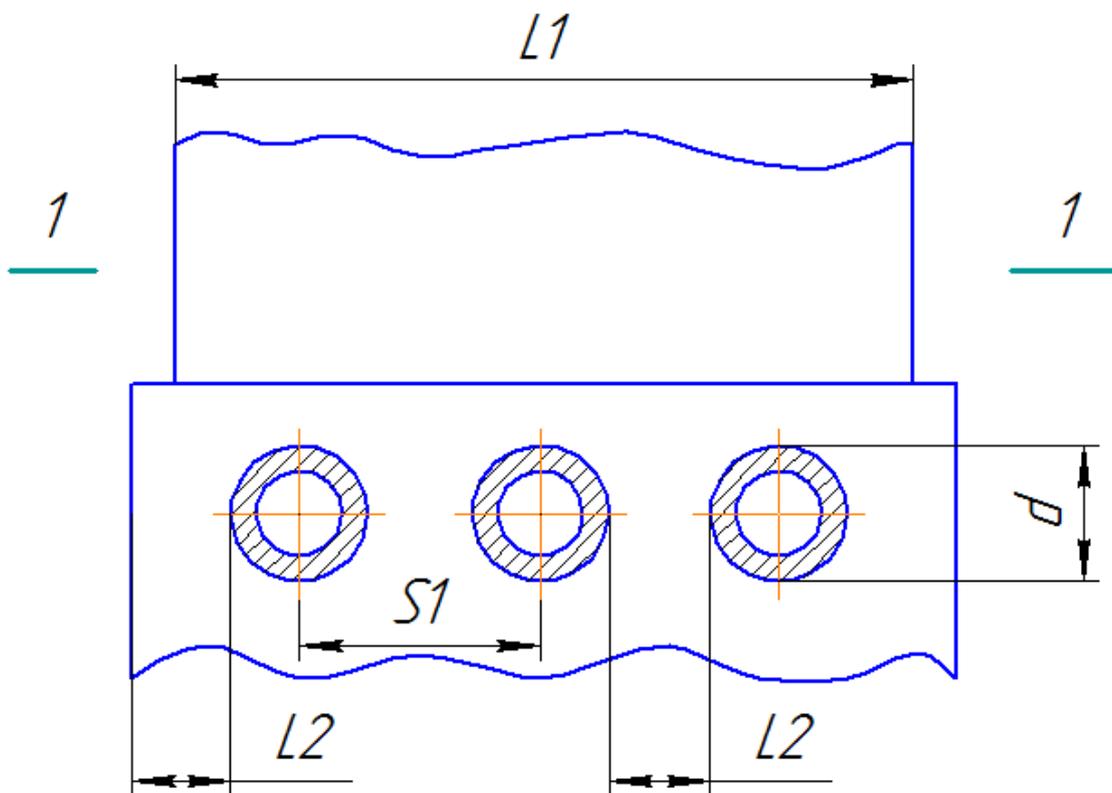


Рисунок 7 - К определению проходных сечений

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА. 311600. 001 ПЗ

Лист

24

Зная скорость в сечении 1-1 (измеренная анемометром), определим расход воздуха:

$$Q = w_0 \cdot S_{сеч.},$$

где Q - расход среды, м³/с

$S_{сеч.}$ - площадь проходного сечения, м².

$$S_{сеч.1-1} = 0,27 \cdot 0,145 = 0,04 \text{ м}^2,$$

$$Q = w_{изм} \cdot S_{сеч.} = 0,7 \cdot 0,04 = 0,028 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$S_{сеч.} = 0,28 \cdot 0,17 - 3 \cdot 0,28 \cdot 0,025 = 0,028 \text{ м}^2,$$

$$w_0 = \frac{Q}{S_{сеч.}} = \frac{0,028}{0,028} = 1 \text{ м/с},$$

$$a = \frac{s_1}{d} = \frac{0,028}{0,025} = 1,12$$

$$\bar{w} = w_0 \cdot \frac{a}{a-1} = 1 \cdot \frac{1,12}{1,12-1} = 9,3 \text{ м/с}.$$

					<i>ФЮРА. 311600. 001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Рассмотрим одиночный круглый цилиндр (трубу), обтекаемый поперечным потоком. Будем считать, что длина цилиндра велика по сравнению с его диаметром ($l \gg d$), поверхность цилиндра гладкая, температура поверхности всюду одинакова и равна t_c . Температура t_0 и скорость w_0 набегающего потока вдали от цилиндра постоянны, причем $t_0 < t_c$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности цилиндра к жидкости в точке, характеризуемой углом φ (рисунок 8), равен;

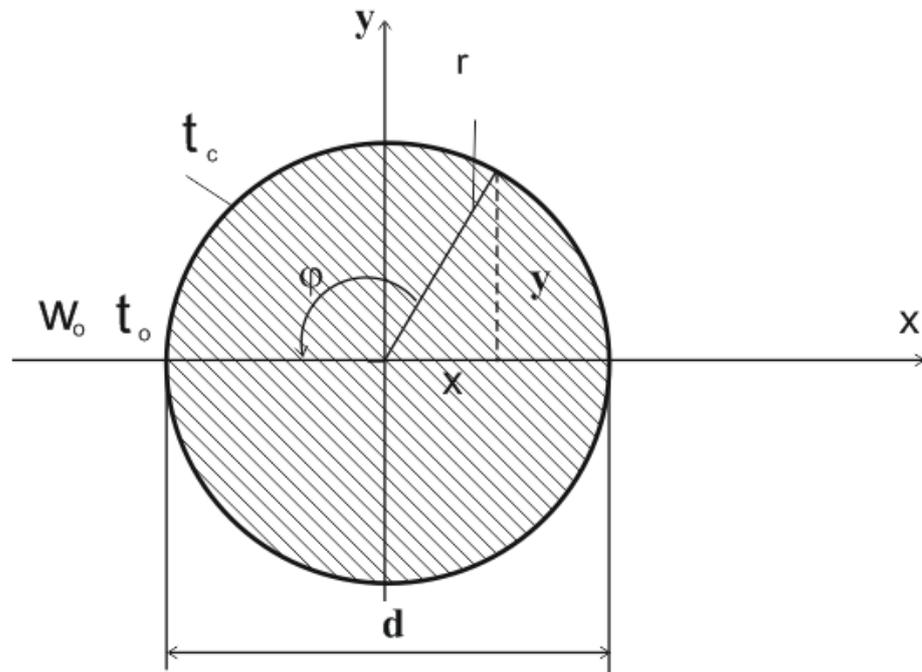


Рисунок 8 - К выводу уравнений (4.1), (4.2)

$$\alpha_{\varphi} = \frac{\lambda}{\mathcal{G}_c} \left(\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial r} \right)_{r = \frac{d}{2}} \quad (4.1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности жидкости;

$$\mathcal{G} = t - t_0; \quad \mathcal{G}_c = t_c - t_0;$$

t - температура жидкости.

Из (4.1) следует, что для определения α_φ необходимо знать поле температур в жидкости вблизи тела. Ограничим задачу случаем, когда жидкость несжимаема, физические параметры не зависят от температуры, а теплота трения и силы тяжести могут не приниматься во внимание (скорости невелики, свободные поверхности отсутствуют). В этом случае температурное поле в жидкости описывается системой уравнений, которые мы запишем в векторной форме:

$$(\vec{\omega}, \text{grad } \vartheta) = \alpha \nabla^2 \vartheta, \quad (4.2)$$

$$(\vec{\omega}, \text{grad}) \vec{\omega} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \vec{\omega}, \quad (4.3)$$

$$\text{div } \vec{\omega} = 0. \quad (4.4)$$

Краевые условия будут:

$$\text{При } r = \frac{d}{2}; \omega_x = \omega_y = 0; \vartheta = \vartheta_c;$$

$$\text{При } \varphi = 0 \text{ и } r \rightarrow \infty: \omega_x = \omega_0; \omega_y = 0; \vartheta = 0.$$

Для приведения уравнений (4.1) ÷ (4.4) к безразмерному виду примем в качестве масштабов: для температур ϑ_c , для скоростей ω_0 , для линейных размеров и координат d . Безразмерные величины будем обозначать соответствующими заглавными буквами. После преобразований получим:

$$Nu_\varphi = \left(\frac{\partial \theta}{\partial R} \right) R = 1/2; \quad (4.1a)$$

$$Pe(\vec{W}, \text{grad} \theta) = \nabla^2 \theta; \quad (4.1б)$$

$$(\vec{W}, \text{grad}) \vec{W} = -\text{grad} P + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{W}; \quad (4.1в)$$

В уравнениях (4.1a) ÷ (4.1в) обозначены:

$$Nu_\varphi = \frac{\alpha_\varphi d}{\lambda}; Pe = \frac{\omega_0 d}{a}; Re = \frac{\omega_0 d}{\nu}; P = \frac{p}{\rho \omega_0^2}; \theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_c};$$

$$\vec{W} = \frac{\vec{\omega}}{\omega_0}; R = \frac{r}{d}; X = \frac{x}{d};$$

и аналогично остальные величины.

									Лист
									27
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	ФЮРА. 311600. 001 ПЗ				

Так как для несжимаемой жидкости поле скоростей не зависит от давления, то из уравнений (4.1а), (4.1б) и (4.1в) и краевых условий следует, что

$$\text{Nu}_\varphi = f(\text{Re}, \text{Pe}, \varphi). \quad (4.5)$$

Полученное уравнение требует уточнения. Для простоты выкладок мы считали, что поток, набегающий на тело, не завихрен и, следовательно, скорость набегающего потока постоянна во времени по величине и направлению. Между тем, в практических условиях поток обычно является турбулентным и, следовательно, вихревым по своей природе. Турбулентному потоку свойственны пульсации скорости, оказывающие существенное влияние на теплоотдачу и сопротивление обтекаемого тела.

Если обозначить ω действительную скорость набегающего потока, изменяющуюся во времени, а под ω_0 понимать скорость, осредненную во времени, т. е.

$$\omega_0 = \bar{\omega} = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \omega d\tau$$

(ω_0 постоянна), то разность $\omega - \bar{\omega} = \omega^1$ называется пульсацией скорости, а величина

$$\overline{\Delta\omega} = \sqrt{\frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\omega^1)^2 d\tau}$$

называется средней квадратичной пульсацией скорости. Скорость ω_0 будет показывать трубка Пито, установленная впереди тела, а величину $\overline{\Delta\omega}$ можно измерить при помощи термоанемометра.

Анализ процесса с учетом отмеченных свойств турбулентного потока приводит к появлению в уравнении (4.5) нового критерия $K = \frac{\overline{\Delta\omega}}{\omega_0}$,

характеризующего интенсивность турбулентных пульсаций или, как часто говорят, степень турбулентности набегающего потока. Таким образом, уравнение (4.5) примет вид:

$$Nu_{\varphi} = F(Re, Pr, K, \varphi)$$

Средний по поверхности цилиндра критерий Нуссельта, очевидно, будет равен:

$$Nu = \psi(Re, Pr, K),$$

а для газов одинаковой атомности ($Pr = const$):

$$Nu = \psi(Re, K).$$

Чтобы установить из опыта зависимость для среднего коэффициента теплоотдачи α или критерия $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$, достаточно производить измерение следующих величин: количества тепла Q , которое отдает цилиндр в единицу времени, температур t_c и t_{oc} , скорости w_0 и средней квадратичной пульсации скорости $\overline{\Delta w}$

Критерий Pe заменен произведением $Pr * Re = Pe$.

Если изготовить цилиндр достаточно длинным или принять меры к устранению потерь тепла с торцов, то можно считать, что полное количество тепла Q равно количеству тепла, которое отдает цилиндр с боковой поверхности. Тогда средний по поверхности цилиндра коэффициент теплоотдачи конвекцией будет равен:

$$\alpha = \frac{Q - Q_{из}}{(t_c - t_0)F}, \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{ час } ^\circ\text{C}} \quad (4.7)$$

где F —боковая поверхность цилиндра;

$Q_{из}$ - поправка на излучение, которая может быть вычислена по формуле:

$$Q_{из} = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] F, \text{ ккал / час} \quad (4.8)$$

здесь ε - степень черноты поверхности цилиндра

C_0 - 4,90 ккал/м² час · К;

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ док.им.	Подпись	Дата		29

T_c и T_0 —абсолютные температуры поверхности цилиндра и набегающего потока воздуха.

Имея α , вычисляют средний критерий:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \quad (4.9)$$

Критерии Re , Pe , K вычисляются по приведенным выше формулам.

При исследовании зависимости (4.5) необходимо определять из опыта локальные коэффициенты теплоотдачи α_φ в различных точках поверхности цилиндра. Определение α_φ возможно двумя методами. Первый метод вытекает из уравнения (4.1) и требует измерения градиентов температуры в жидкости на поверхности цилиндра. Эти измерения могут быть выполнены оптическим способом. Другой метод, предложенный Г. Н. Кружилиным и В. А. Швабом, состоит в определении α_φ через градиент температур в стенке цилиндра на его внешней поверхности. Рассмотрим его подробнее. Тепловой поток на поверхности цилиндра в точке, характеризуемой углом φ , равен:

$$q_\varphi = -\lambda_c \left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)_{r=r_2} \quad (4.10)$$

где λ_c — коэффициент теплопроводности материала стенки;

$\frac{\partial t}{\partial r}$ — градиент температур в стенке цилиндра;

r_2 — внешний радиус цилиндра.

Принято, что температура тел, окружающих цилиндр, приблизительно равна температуре потока воздуха.

Коэффициент теплоотдачи в точке с координатой φ

$$\alpha_\varphi = -\frac{\lambda_c}{t_c - t_0} \left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)_{r=r_2} \quad (4.11)$$

Из этого уравнения следует, что определение α_φ сводится к определению поля температур в стенке цилиндра.

Выполним опытный цилиндр полым и будем поддерживать температуру на его внутренней поверхности всюду одинаковой и равной t_{c1} . Температура на

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

внешней поверхности цилиндра t_c , очевидно, будет изменяться по окружности вместе с α_φ . Пусть зависимость $t_c = t_c(\varphi)$ определена из опыта и, таким образом, известна. Распределение температур в стенке цилиндра можно определить, решив уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} = 0, \quad (4.12)$$

При краевых условиях

$$\text{при } r = r_1 : t = t_{c1} = \text{const}, \text{ при } r = r_2 : t = t_c(\varphi). \quad (4.13)$$

В результате вычислений определяется функция $t = t(r, \varphi)$ а затем по формуле (4.12) находится α_φ . Опуская математические выкладки, приведем окончательную формулу для вычисления α_φ выведенную Г. Н. Кружилиным и В. А. Швабом

$$\alpha_\varphi = \frac{\lambda_c}{[t_c(\varphi) - t_0] r^2} \left[\frac{t_{c1} - a_0}{\ln \frac{r_2}{r_1}} - \sum_{n=1}^{n=k} a_n \frac{n(r_2^{2n} + r_1^{2n})}{r_2^{2n} - r_1^{2n}} \cos n\varphi \right] - \frac{Q_{uz}}{F(t_c - t_0)},$$

где φ - угол между радиус-вектором данной точки поверхности и направлением потока;

r_1 и r_2 - внутренний и внешний радиусы цилиндра,

t_{c1} - температура на внутренней поверхности цилиндра;

$t_c(\varphi)$ - найденное из опыта распределение температур на внешней поверхности цилиндра (задается в виде кривой, характер которой зависит от числа Рейнольдса и других факторов);

a_0, a_1, \dots, a_k - коэффициенты разложения функции в ряд Фурье
коэффициенты a_0, a_1, \dots и т. д. определяются при помощи гармонического анализа кривой $t_c(\varphi)$;

t_c - средняя температура поверхности цилиндра;

Q_{uz} - поправка, определяемая по формуле (4.8).

Таким образом, определение локального коэффициента теплоотдачи рассмотренным методом требует измерения распределения температур на

внешней поверхности цилиндра и температуры t_{cl} на внутренней поверхности при условии, что последняя тем или другим способом поддерживается постоянной. Следует отметить, что термическое сопротивление стенки цилиндра должно быть достаточно большим, в противном случае кривая распределения температур $t_c(\varphi)$ и последующие вычисления будут недостаточно точными.

Перейдем теперь к вопросу о сопротивлении цилиндра.

Сила, с которой поток воздействует на тело, обусловлена двумя факторами:

а) неравномерным распределением давления по поверхности обтекаемого тела

б) трением между поверхностью тела и жидкостью. Поэтому полное сопротивление цилиндра, кг:

$$P = P_d + P_m \quad (e)$$

Где P_d - сопротивление давления,

P_m - сопротивление трения.

P_d представляет собой проекцию равнодействующей сил давления на направление потока, т. е.

$$P_d = l \int_0^{2\pi} p_c \cos \varphi \frac{d}{2} d\varphi, \quad (ж)$$

Где d - диаметр цилиндра;

p_c - давление на поверхности цилиндра, кг/м²

Из уравнения (в) и предшествующих пояснений следует, что безразмерное давление на поверхности цилиндра:

$$P_c = \frac{P_c}{\rho \omega_0^2} = \psi_p(Re, K, \varphi) \quad (з)$$

Подставляя p_c в уравнение (ж), после преобразований получим:

$$P_d = c_d \frac{\rho \omega_0^2}{2} f \quad (4.14)$$

где $C_\delta = \psi_\delta(Re, K)$.

Величина C_δ называется коэффициентом сопротивления давлений.

$f = d \cdot l$ представляет собой площадь миделевого сечения.

Сопротивление трения, т. е. проекция равнодействующей сил трения на направление потока:

$$P_m = \int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial \omega_\varphi}{\partial r} \right)_{r=\frac{d}{2}} \sin \varphi \frac{d}{2} d\varphi$$

где ω_φ — составляющая скорости, перпендикулярная радиусу.

Безразмерная скорость:

$$W_\varphi = \frac{\omega_\varphi}{\omega_0} = \psi_w(Re, K, \varphi). \quad (к)$$

Подставляя ω_φ из (к) в (и), получим для P_m выражение, аналогичное (14);

$$P_m = C_m \frac{\rho \omega_0^2}{2} f, \quad (4.15)$$

$$C_m = \psi_m(Re, K); \quad (4.16)$$

C_m называется коэффициентом сопротивления трения.

Очевидно, что полное сопротивление цилиндра можно представить в виде:

$$P = C \frac{\rho \omega_0^2}{2} f \quad (4.17)$$

где

$$C = \Phi_c(Re, K); \quad (4.18)$$

Величина $C = C_\delta + C_m$ называется коэффициентом, полного сопротивления.

Рассмотрим два предельных случая.

Если в потоке отсутствуют пульсации скорости ($K = 0$) и силами инерции можно пренебречь по сравнению с силами вязкости, то для коэффициентов сопротивления имеем уравнения:

$$C_\delta = \frac{const_1}{Re}, C_m = \frac{const_2}{Re}, C = \frac{const}{Re}.$$

Если силами вязкости можно пренебречь по сравнению с силами инерции, то

$$C_m = 0, C = C_\delta = \Phi_0(K)$$

Для установления из опыта зависимостей (4.14), (4.16) и (4.18) достаточно производить измерения сил P_d , P_m и p , скорости ω_0 , средней квадратичной пульсации скорости $\overline{\Delta\omega}$ и температур t_0 и t_c (для определения ν и ρ). Сила P может быть измерена непосредственно при помощи аэродинамических весов. Сила P_δ находится путем измерения распределения давлений по поверхности цилиндра, а сила P_m обычно определяется, как разность между P и P_d .

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата		34

4.1 Описание экспериментальной установки

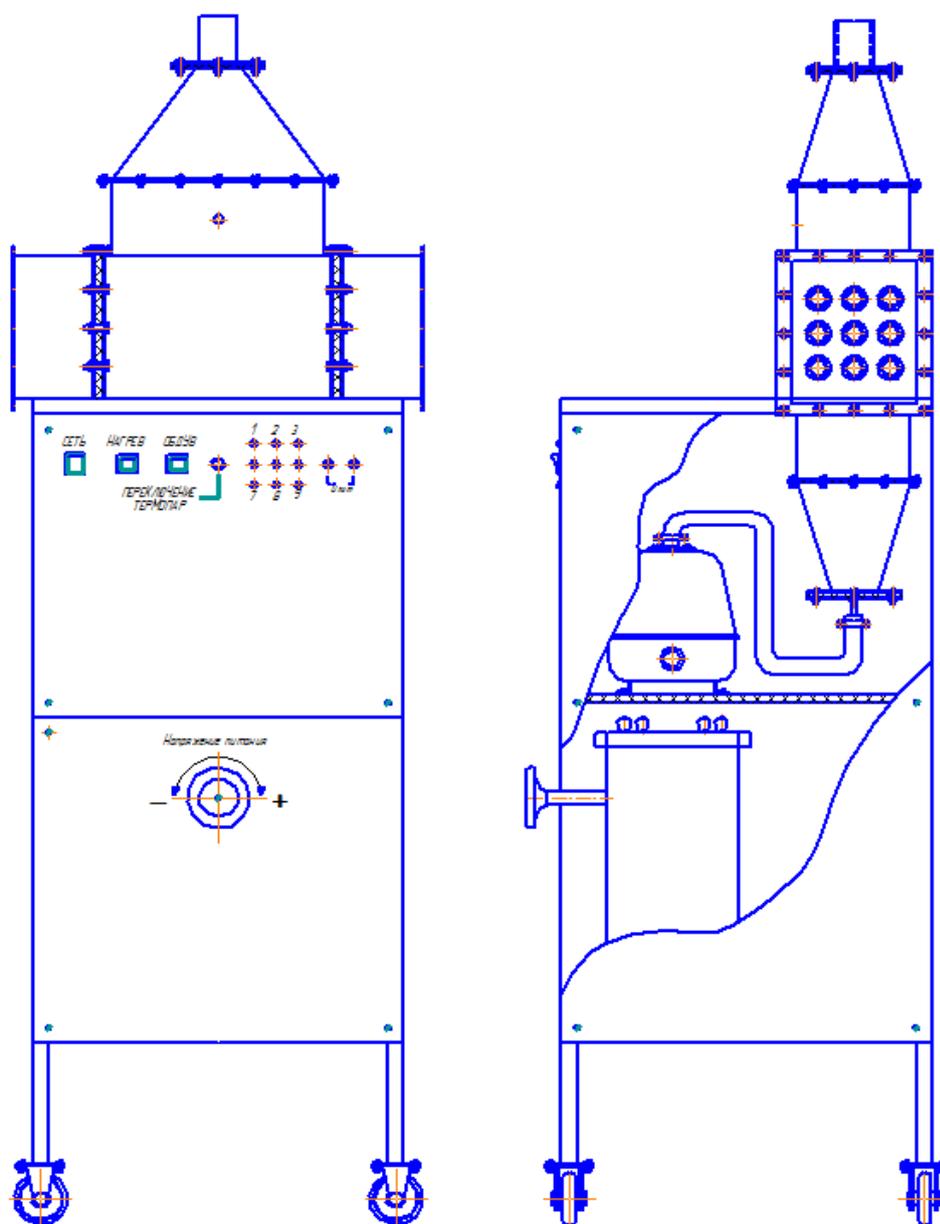


Рисунок 9 - Общий вид экспериментального стенда

Опытный участок (3) представляет собой металлический кожух поперечного квадратного сечения. Верхняя и нижняя части имеют присоединяемые фланцы со входным (14) и выходным (13) штуцерами. По длине рабочего участка располагается девять теплообменных цилиндров (4), изготовленных из латунных труб наружным диаметром $d=25$ мм и длиной $l=280$ мм, образующих коридорный трубный пучок размером 3×3 . Внутри всех цилиндров расположены электрические нагреватели (5), выполненные из

Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата

ФЮРА. 311600. 001 ПЗ

Лист

35

нихромовой проволоки, которая намотана на керамическую трубку с одинаковым шагом между витками, для обеспечения равномерной плотности теплового потока. Зазор между внутренней стенкой латунной трубы и нагревателем заполнен кварцевым песком. Для уменьшения потерь тепла через торцы цилиндра, на его концах установлены заглушки из асбоцемента. К стенке латунной трубы заподлицо с поверхностью припаяны хромель-копелевые термопары (6,9).

Выводы от нагревателей и термоэлектрические провода пропущены, для подсоединения к соответствующим элементам схемы питания и измерения, через торцевые заглушки. Питание нагревателя осуществляется от однофазного ЛАТР (1), позволяющего плавно изменять напряжение переменного тока подаваемого на нагреватель. Для определения электрических параметров нагревателя (напряжения) в схеме используется канал измерения напряжения переменного тока цифрового мультиметра АРРА-305 (2). Измерительный сигнал в виде ТермоЭДС поступает на контакты шагового искателя ШИ 25/4 (7), который под воздействием управляющего переключателя (8) коммутирует одновременно сигналы с трех разных труб (в зависимости от положения) на вход модуля ввода NI 9211 (10). Данный модуль работает в составе контроллера NI cDAQ 9174 (11), соединенного USB-интерфейсом с персональным компьютером (12). При включении нагнетателя (17) воздух проходит по соединительному шлангу (15), попадает во входной штуцер, проходит через опытный участок экспериментальной установки, поперечно омывая при этом пучок труб. Скорость воздушного потока измеряется анемометром Актакон АТТ-1006 (16).

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докцм.	Подпись	Дата		36

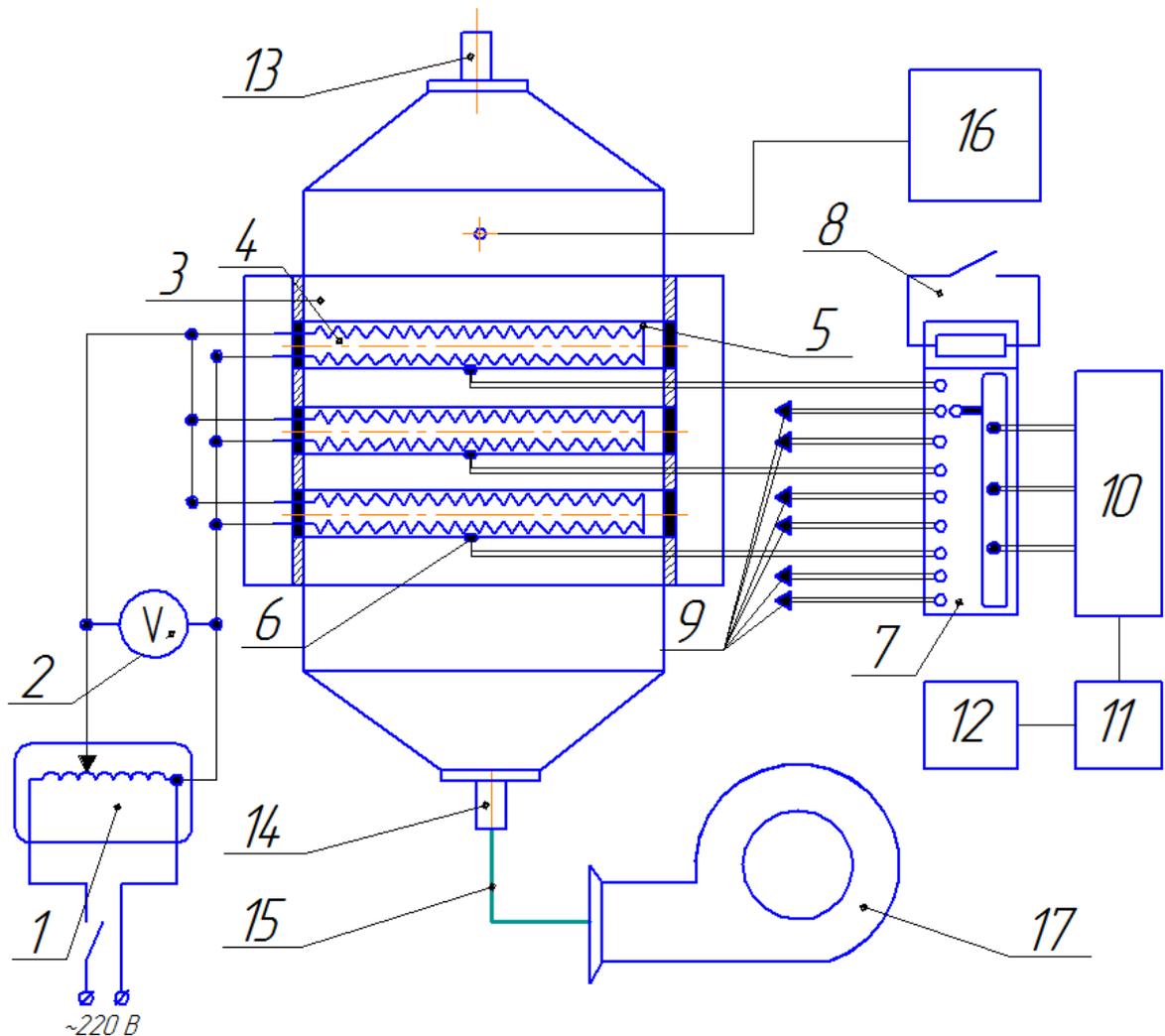


Рисунок 10 - Принципиальная схема экспериментальной установки

- 1 - Регулятор напряжения. 2 - Вольтметр переменного тока. 3 - Опытный участок. 4 - Теплообменная труба. 5 - Нагреватель из нихромовой проволоки. 6 - Термопара. 7 - Шаговый искатель. 8 - Переключатель шагового искателя. 9 - К термопарам глубинных рядов. 10 - модуль для подключения термопар NI 9211. 11- контроллер NI cDAQ 9174. 12 - Персональный компьютер. 13 - Выходной штуцер. 14 - Входной штуцер. 15 - Соединительный шланг. 16 - Анемометр. 17 - Компрессор.

Изм.	Лист	№ док-м.	Подпись	Дата

ФЮРА. 311600. 001 ПЗ

Лист

37

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Рассмотрим стационарный процесс теплоотдачи при естественной конвекции от горизонтального цилиндра, расположенного в газообразной среде (рисунок 11).

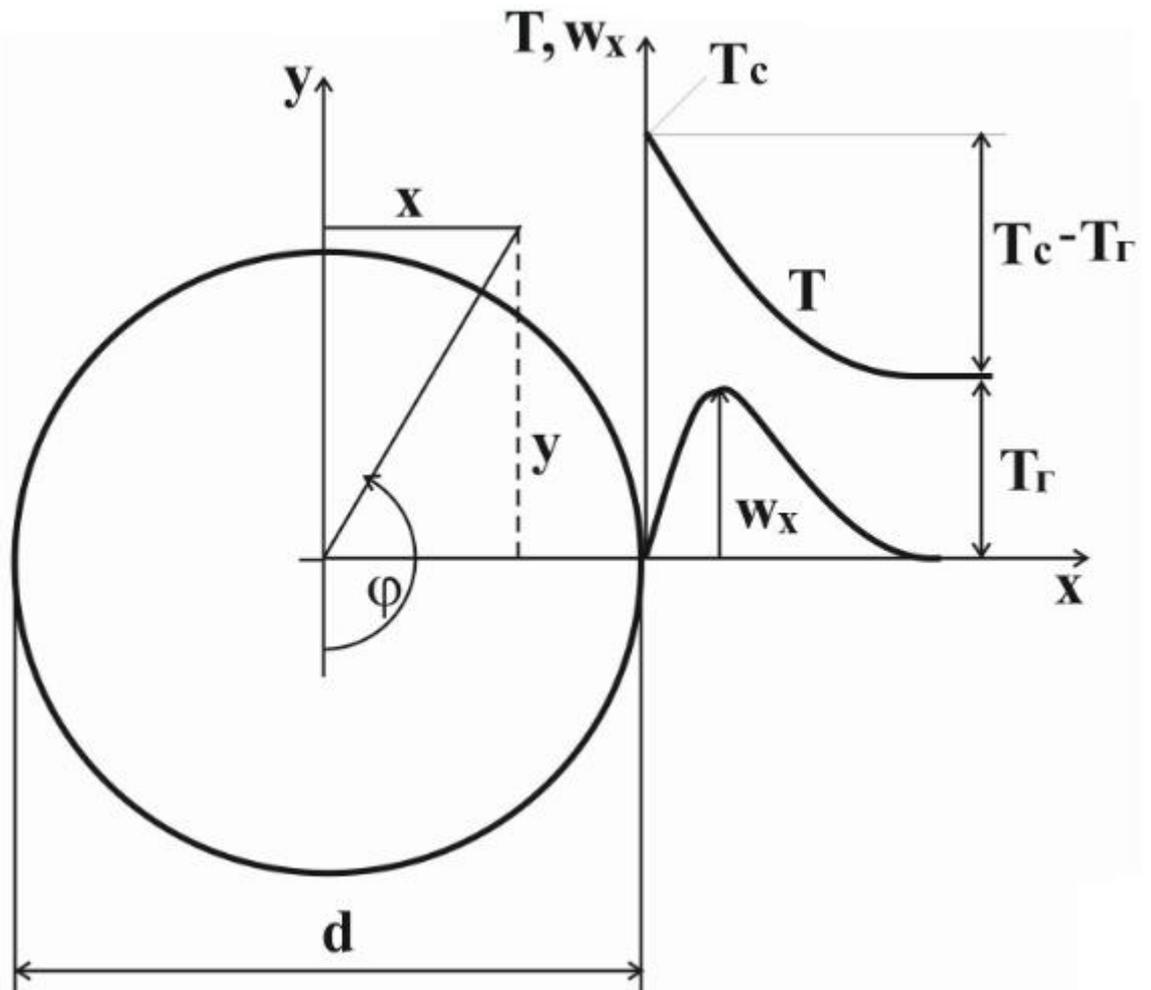


Рисунок 11 - Распределение температур и скоростей вблизи поверхности цилиндра при естественной конвекции воздуха

Вдали от цилиндра газ неподвижен, а температура газа постоянна и равна T_r . Поверхность цилиндра имеет всюду одинаковую температуру T_{II} . Очевидно, что температура газа вблизи цилиндра изменяется от T_{II} до T_r , поэтому плотность газа вблизи стенки будет меньше плотности вдали от нее. Под действием возникающей при этом подъемной силы газ у стенки движется снизу вверх. Если учесть, что скорость газа на стенке и вдали от нее равны

нулю, то распределение скоростей вблизи стенки можно представить себе таким, как это показано на рисунке 11. Движение газа в рассматриваемых условиях называется свободным движением или естественной конвекцией.

Задача состоит в том, чтобы изучить экспериментально влияние различных факторов на теплоотдачу цилиндра и установить зависимость для расчета потока тепла или коэффициента теплоотдачи от поверхности пучков цилиндров к газу.

Для простоты будем считать, что все физические параметры жидкости кроме плотности не зависят от температуры. Теплоотдачу с торцов цилиндров учитывать не будем, т.к. они покрыты слоем тепловой изоляции. В связи с тем, что у поверхности цилиндров имеется тонкий слой неподвижного газа, то для расчета локальной плотности теплового потока проходящего через этот слой можно использовать закон Фурье:

$$q_F = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=\frac{d}{2}}, \quad (5.1)$$

где q_F - локальная плотность теплового потока вблизи стенки цилиндра, Вт/м²;

d - диаметр цилиндра, м;

λ - коэффициент теплопроводности газа, Вт/мК;

T - температура газа в точке, имеющей координаты x , y или

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$, φ , К;

С другой стороны, согласно закону Ньютона-Рихмана:

$$q_F = \alpha_\varphi (T_{II} - T_I), \quad (5.2)$$

где α_φ - локальный коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К;

T_{II} - температура поверхности цилиндра, К;

T_I - температура газа, К.

Приравнявая, друг к другу правые части уравнений (5.1) и (5.2), получаем:

$$\alpha_{\varphi} = -\frac{\lambda}{T_{II} - T_I} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=\frac{d}{2}} \cdot \quad (5.3)$$

Уравнение (5.3), описывающее процесс теплоотдачи на границе цилиндра называется дифференциальным уравнением теплоотдачи.

Из уравнения (5.3) следует, что коэффициент теплоотдачи определяется полем температур в газе и его коэффициентом теплопроводности. В данном случае поле температур в газе будет двухмерным (температура вдоль оси координаты, перпендикулярной к плоскости чертежа, не изменяется) и стационарным, т.е. $T = f(r, \varphi)$ или $T = f(x, y)$. Так как процесс теплообмена протекает в движущемся газе, то температурное поле описывается следующей системой уравнений:

$$(\vec{w}, \text{grad } T) = a \nabla^2 T, \quad (5.4)$$

$$\rho(\vec{w}, \text{grad } w_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 w_x, \quad (5.5)$$

$$\rho(\vec{w}, \text{grad } w_y) = \rho g - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 w_y, \quad (5.6)$$

$$\text{div}(\rho \vec{w}) = 0, \quad (5.7)$$

$$\rho = f(T). \quad (5.8)$$

В уравнениях (5.4) - (5.8) обозначено:

\vec{w} - вектор скорости, м/с

w_x и w_y - проекции вектора скорости на оси координат x и y ;

p - давление, Па;

a - коэффициент температуропроводности, м²/с;

ρ - плотность, кг/м³;

μ - динамическая вязкость жидкости, Па·с;

g - ускорение силы тяжести, м/с².

Примем в заданном интервале температур зависимость ρ от T (уравнение (5.8)) линейной:

$$\rho = \rho_T [1 - \beta(T - T_T)], \quad (5.9)$$

где ρ_{Γ} - плотность газа при температуре T_{Γ} , кг/м³;

β - температурный коэффициент объемного расширения жидкости, который в интервале температур от T_{Γ} до T_{Π} , рассматривается как величина постоянная, 1/К;

Величина β , очевидно, будет равна:

$$\beta = \frac{\rho_{\Gamma} - \rho_{\Pi}}{\rho_{\Gamma}(T_{\Gamma} - T_{\Pi})}.$$

Для газов при $p = \text{const}$, учитывая, что $\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\Pi}} = \frac{T_{\Pi}}{T_{\Gamma}}$, величина β определяется формулой:

$$\beta = \frac{1}{T_{\Pi}}, \quad (5.10)$$

где T_{Π} - температура газа вблизи стенки, выраженная в градусах Кельвина.

К системе уравнений (5.3) - (5.8) необходимо присоединить краевые условия, отвечающие поставленной задаче:

$$\text{При } r = \frac{d}{2}, w_x = w_y = 0, T = T_{\Pi};$$

$$\text{При } r \rightarrow \infty, w_x = w_y = 0, T = T_{\Gamma}. \quad (5.11)$$

Из уравнений (5.3) - (5.11) видно, что α , а также T , w_x , w_y , p зависят от большого числа величин (x , y , a , d , β , g и т.д.). Однако величины, содержащиеся в уравнениях, возможно сгруппировать в безразмерные комплексы - критерии подобия, число которых будет меньше числа величин. Это дает большие преимущества при постановке опытов и обобщения их результатов.

Выберем в качестве масштабов для линейных размеров и координат диаметр цилиндра, а для температур величину $\Delta T_{\Pi} = T_{\Pi} - T_{\Gamma}$.

Обозначим безразмерные величины

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

$$\tilde{x} = \frac{x}{d}, \quad \tilde{y} = \frac{y}{d}, \quad \tilde{r} = \frac{r}{d}, \quad \tilde{T} = \frac{T - T_\Gamma}{T_\Pi - T_\Gamma}.$$

Подставим в уравнения (5.3) - (5.7) и краевые условия (5.11) вместо x, y, T величины

$$x = \tilde{x}l, \quad y = \tilde{y}l, \quad T = T_\Gamma + \tilde{T}(T_\Pi - T_\Gamma).$$

После некоторых преобразований получим безразмерные уравнения:

$$Nu_\varphi = - \left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} \right)_{\tilde{r}=\frac{d}{2}} \quad (5.12)$$

$$(\overline{Pe}, \tilde{\nabla} \tilde{T}) = \tilde{\nabla}^2 \tilde{T}, \quad (5.13)$$

$$(1 - \beta \Delta T_\Pi \tilde{T})(\overline{Pe}, \tilde{\nabla} Pe_x) = -Pr^2 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} + Pr \tilde{\nabla}^2 Pe_x, \quad (5.14)$$

$$(1 - \beta \Delta T_\Pi \tilde{T})(\overline{Pe}, \tilde{\nabla} Pe_y) = GrPr^2 \left(\frac{1}{\beta \Delta T_\Pi} - \tilde{T} \right) - Pr^2 \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{y}} + Pr \tilde{\nabla}^2 Pe_y, \quad (5.15)$$

$$\tilde{\text{div}} \left[(1 - \beta \Delta T_\Pi \tilde{T}) \overline{Pe} \right] = 0. \quad (5.16)$$

и безразмерные краевые условия

$$\text{при } \tilde{r} = \frac{1}{2}, \quad Pe_x = Pe_y = 0, \quad \tilde{T} = 1,$$

$$\text{при } \tilde{r} \rightarrow \infty, \quad Pe_x = Pe_y = 0, \quad \tilde{T} = 0. \quad (5.17)$$

В уравнениях (5.12) - (5.17) обозначено

$$\overline{Pe} = \frac{\bar{w}d}{a}, \quad Pe_x = \frac{w_x d}{a}, \quad Pe_y = \frac{w_y d}{a} - \text{критерии конвективного теплообмена}$$

(Пекле);

$$\tilde{p} = \frac{pd^2}{\rho_\Gamma v^2} - \text{безразмерное давление;}$$

$$Gr = \frac{g \beta d^3 (T_\Pi - T_\Gamma)}{v^2} - \text{критерий подъемной силы (Грасгофа);}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} - \text{критерий физических свойств (Прандтля);}$$

$$Nu_\varphi = \frac{\alpha_\varphi d}{\lambda} - \text{локальный критерий теплоотдачи (Нуссельта);}$$

$\nu = \frac{\mu}{\rho_{\Gamma}}$ - кинематическая вязкость газа;

Критерии Nu_{φ} , Pe_x , Pe_y , \tilde{T} , \tilde{p} могут рассматриваться как новые зависимые переменные (числа подобия), \tilde{x} и \tilde{y} - как новые независимые переменные, а критерии Gr , Pr , $\beta\Delta T_{\Pi}$ - как новые постоянные (критерии подобия).

Из уравнений (5.12) - (5.16) и краевых условий (5.17) следует, что

$$\tilde{T} = f_1(\tilde{x}, \tilde{y}, Gr, Pr, \beta\Delta T_{\Pi}), \quad (5.18)$$

или в полярных координатах

$$Nu = f_2(\tilde{r}, \varphi, Gr, Pr, \beta\Delta T_{\Pi}). \quad (5.19)$$

В большинстве случаев ограничиваются изучением среднего коэффициента теплоотдачи

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \alpha_{\varphi} d\varphi \quad \text{или} \quad \overline{Nu} = -\frac{1}{\pi} \int_0^1 \left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} \right)_{\tilde{r}=\frac{1}{2}} d\varphi. \quad (5.20)$$

Подставляя в (5.20) выражение для из уравнения (5.18), получим

$$\overline{Nu} = f_3(Gr, Pr, \beta\Delta T_{\Pi}). \quad (5.21)$$

Если силы инерции пренебрежительно малы по сравнению с силами вязкости и гравитационными силами, то левую часть уравнения (5.14) и (5.15) можно принять нулю. Тогда вместо (5.21), имеем уравнение

$$\overline{Nu} = f_4(Gr \cdot Pr, \beta\Delta T_{\Pi}). \quad (22)$$

Выполненные до сих пор исследования не обнаруживают непосредственного влияния $\beta\Delta T_{\Pi}$ на теплообмен при естественной конвекции, поэтому вместо (5.22) можно пользоваться уравнением

$$\overline{Nu} = f_5(Gr \cdot Pr). \quad (5.23)$$

Нахождение зависимости (5.23) и является задачей экспериментального исследования теплообмена при свободной конвекции.

Уравнения (5.18) - (5.23) получены в предположении, что

теплофизические свойства α , ν , μ постоянны. В действительности теплофизические параметры зависят от температуры. Чтобы учесть хотя бы приближенно эту зависимость, физические параметры относят к некоторой искусственно подобранной температуре, называемой определяющей. Определяющая температура выбирается так, чтобы при наименьшем разбросе опытных точек получить наиболее простую зависимость \overline{Nu} от Gr и Pr в возможно более широком интервале изменения последних.

Как показывает опыт, в данном случае наилучшие результаты дает вычисление определяющей температуры по формуле:

$$T_o = \frac{1}{2}(T_{II} + T_{Г}). \quad (5.24)$$

Выше при анализе условий подобия теплообмен излучением не принимался во внимание. Конвективный теплообмен можно рассматривать независимо от лучистого теплообмена лишь в тех случаях, когда среда, окружающая тело, абсолютно прозрачна или совершенно не прозрачна для тепловых лучей. Если эти условия не выполняются, оба процесса должны рассматриваться совместно. В нашем случае цилиндр находится в воздухе, который не поглощает лучистой энергии. Тогда общее количество тепла, которое отдает цилиндр с боковой поверхности за счет конвекции и излучения, равно:

$$Q = \bar{\alpha}(T_{II} - T_{Г})F + \varepsilon_{np}\sigma_0(T_{II}^4 - T_{oc}^4)F \quad (5.25)$$

где $F = \pi dL$ - площадь боковой поверхности цилиндра диаметром d и длиной L ;

σ_0 - постоянная Стефана-Больцмана;

T_{II} - абсолютная температура поверхности цилиндра;

T_{oc} - абсолютная температура тел, окружающих цилиндр;

ε_{np} - приведенная степень черноты поверхности цилиндра, которая рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{F}{F_{oc}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{oc}} - 1 \right)},$$

где ε и ε_{oc} - степени черноты поверхности цилиндра и окружающих тел.

Обычно $F \approx F_{oc}$, а ε_{oc} немногим меньше 1, поэтому $\varepsilon_{np} \approx \varepsilon$. Кроме того, обычно можно принять $T_{oc} \approx T_r$. Подставляя в (5.25) вместо ε_{np} и T_{oc} их приближенные значения, получим следующую формулу для вычисления коэффициента теплоотдачи

$$\bar{\alpha} = \frac{Q}{(T_{II} - T_r)F} - \frac{\varepsilon\sigma_0}{T_{II} - T_r} (T_{II}^4 - T_r^4). \quad (5.26)$$

Если цилиндр отдает тепло капельной жидкости, то член, учитывающий излучение, в уравнении (5.26) не будет присутствовать.

Из уравнений (5.23) и (5.26) следует, что для экспериментального определения зависимости (5.23) необходимо измерять количество переданного тепла Q , температуру поверхности цилиндра T_{II} и температуру вдали от цилиндра T_r при различных значениях $\Delta T_{II} = T_{II} - T_r$.

Найденная из опыта зависимость (5.23) будет действительна только для теплоотдачи горизонтальных цилиндров при естественной конвекции газа (или жидкости) в том диапазоне чисел Gr и Pr , который наблюдался в опытах.

5.1 Описание экспериментальной установки

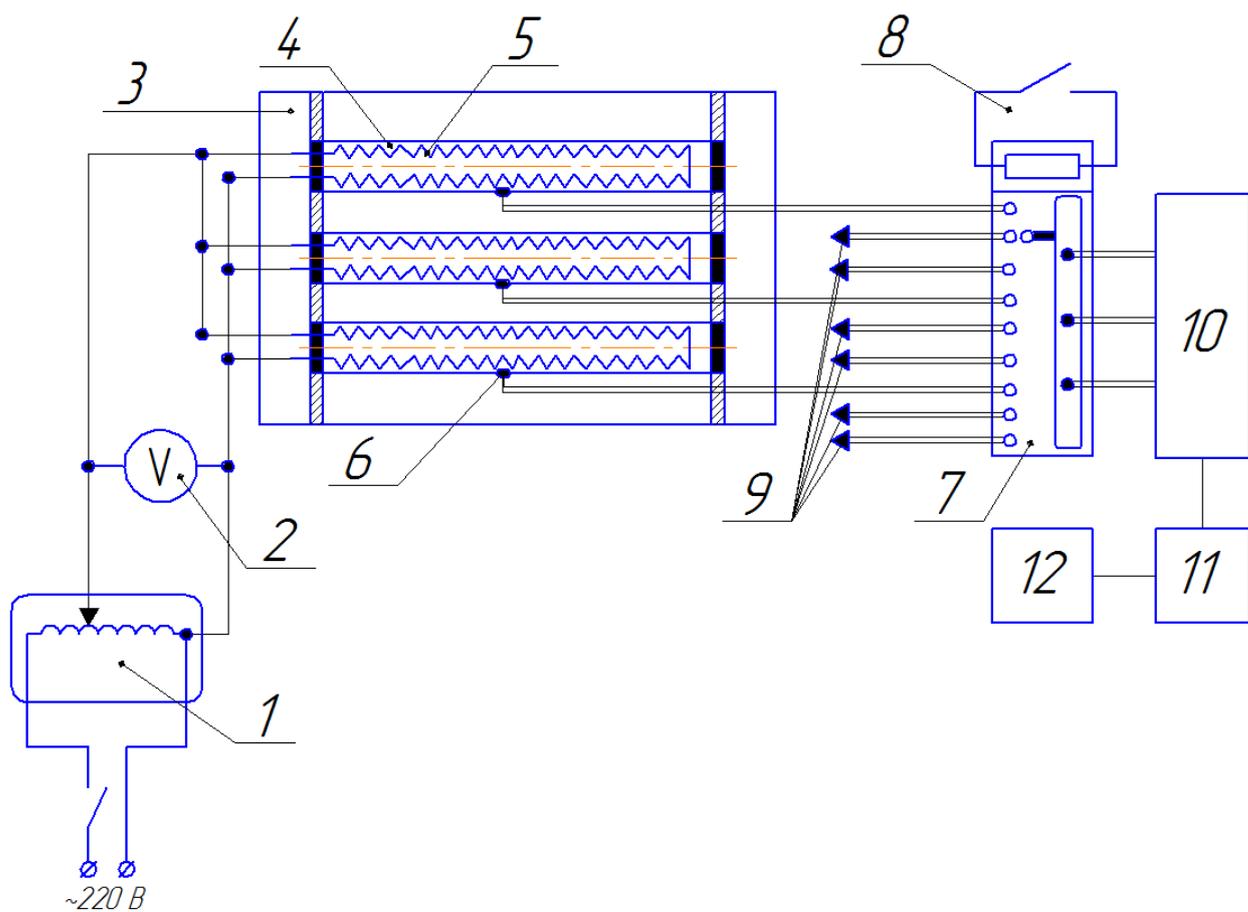


Рисунок 12 - Принципиальная схема экспериментальной установки

1 - Регулятор напряжения. 2 - Вольтметр переменного тока. 3 - Опытный участок. 4 - Теплообменная труба. 5 - Нагреватель из нихромовой проволоки. 6 – Термопара. 7 - Шаговый искатель. 8 - Переключатель шагового искателя. 9 - К термопарам глубинных труб. 10 - модуль для подключения термопар NI 9211. 11- контроллер NI cDAQ 9174. 12 - Персональный компьютер.

Опытный участок (3) представляет собой металлический кожух поперечного квадратного сечения. Верхняя и нижняя части имеют свободное сообщение с атмосферой. По длине рабочего участка располагается девять теплообменных цилиндров (4), изготовленных из латунных труб наружным диаметром $d=25$ мм и длиной $l=280$ мм, образующих коридорный трубный пучок размером 3×3 . Внутри всех цилиндров расположены электрические

Изм.	Лист	№ докцм.	Подпись	Дата

ФЮРА. 311600. 001 ПЗ

Лист

47

нагреватели (5), выполненные из нихромовой проволоки, которая намотана на керамическую трубку с одинаковым шагом между витками, для обеспечения равномерной плотности теплового потока. Зазор между внутренней стенкой латунной трубы и нагревателем заполнен кварцевым песком. Для уменьшения потерь тепла через торцы цилиндра, на его концах установлены заглушки из асбоцемента. К стенке латунной трубы заподлицо с поверхностью припаяны хромель-копелевые термодпары (6,9).

Выводы от нагревателей и термоэлектрические провода пропущены, для подсоединения к соответствующим элементам схемы питания и измерения, через торцевые заглушки. Питание нагревателя осуществляется от однофазного ЛАТР (1), позволяющего плавно изменять напряжение переменного тока подаваемого на нагреватель. Для определения электрических параметров нагревателя (напряжения) в схеме используется канал измерения напряжения переменного тока цифрового мультиметра АРРА-305 (2). Измерительный сигнал в виде ТермоЭДС поступает на контакты шагового искателя ШИ 25/4 (7), который под воздействием управляющего переключателя (8) коммутирует одновременно сигналы с трех разных труб (в зависимости от положения) на вход модуля ввода NI 9211 (10). Данный модуль работает в составе контроллера NI cDAQ 9174 (11), соединенного последовательным USB-интерфейсом с персональным компьютером (12).

6 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

6.1 Исследование теплоотдачи от пучка труб при вынужденной конвекции

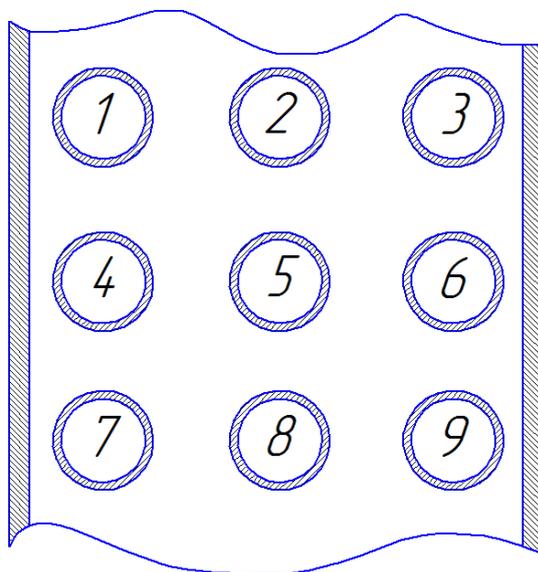


Рисунок 13 - Расположение и нумерация трубок в установке

Общее количество тепла, которое отдает каждая трубка с поверхности:

$$Q = \frac{U_{\text{нагр}}^2}{R} = \frac{100}{20} = 5 \text{ Вт}, \quad (6.1.1)$$

где $U_{\text{нагр}}$ – напряжение на нагревателе

R – сопротивление нагревателя

Вычислим средний по поверхности цилиндра коэффициент теплоотдачи конвекцией без учета потерь на излучение:

$$\alpha = \frac{Q}{(t_c - t_0)F} = \frac{5}{(60,9 - 45) \cdot 0,022} = 14,3 \quad (6.1.2)$$

где t_c – температура стенки образца

t_0 – температура окружающей среды

F - площадь боковой поверхности цилиндра;

$$F = \pi \cdot d \cdot l = 3,14 \cdot 0,025 \cdot 0,28 = 0,022 \text{ м}^2$$

Находим критерий Нуссельта по данным экспериментального исследования:

$$Nu_{расч} = \alpha \cdot \frac{d}{\lambda_{воз}} = 14,3 \cdot \frac{0,025}{0,0263} = 13,58, \quad (6.1.3)$$

где d - диаметр цилиндра

$\lambda_{воз}$ - коэффициент теплопроводности воздуха

Вычисляем число Рейнольдса и определяем, какое течение воздуха:

$$Re = w_0 \cdot \frac{d}{\nu_{воз}} = 2 \cdot \frac{0,025}{1,56 \cdot 10^{-5}} = 2577, \quad (6.1.4)$$

Где w_0 - набегающий поток воздуха

$\nu_{воз}$ - коэффициент кинематической вязкости воздуха

Находим критерий Нуссельта по литературным данным:

$$Nu = cRe^m = 0,27 \cdot (2577)^{0,63} = 33,63 \quad (6.1.5)$$

где $c = 0,27$, а $m = 0,63$.

Эта формула является упрощенным выражением:

$$Nu = cRe^{0,63} Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{ос}}{Pr_c} \right)^{0,25}.$$

Для воздуха в данном интервале температур критерий Прандтля изменяется несущественно, примем $Pr = 0,71$

Вычислим средний по поверхности каждого цилиндра коэффициент теплоотдачи конвекцией с учетом потерь на излучение:

$$\alpha = \frac{Q - Q_{из}}{(t_c - t_0)F} = \frac{5 - 1,64}{(30 - 25) \cdot 0,22} = 9,57, \quad (6.1.6)$$

Где F - площадь боковой поверхности цилиндра;

$$F = \pi \cdot d \cdot l = 3,14 \cdot 0,025 \cdot 0,28 = 0,022 \text{ м}^2$$

$Q_{из}$ - поправка на излучение, которая может быть вычислена по

										Лист
										50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА. 311600. 001 ПЗ					

формуле:

$$Q_{из} = \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_0^4) F = 0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^8 (303 - 278) \cdot 0,022 = 0,1,64 \text{ Вт}, \quad (6.1.7)$$

здесь ε - степень черноты поверхности цилиндра

$$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4;$$

T_c и T_0 - абсолютные температуры поверхности цилиндра и набегающего потока воздуха.

Имея $\alpha_{изл}$, вычисляем средний критерий Нуссельта, учитывая потери на излучение:

$$Nu_{изл} = \alpha_{изл} \cdot \frac{d}{\lambda_{воз}} = 9,57 \cdot \frac{0,025}{0,0263} = 9,1 \quad (6.1.8)$$

Данные эксперимента представлены в приложении А.

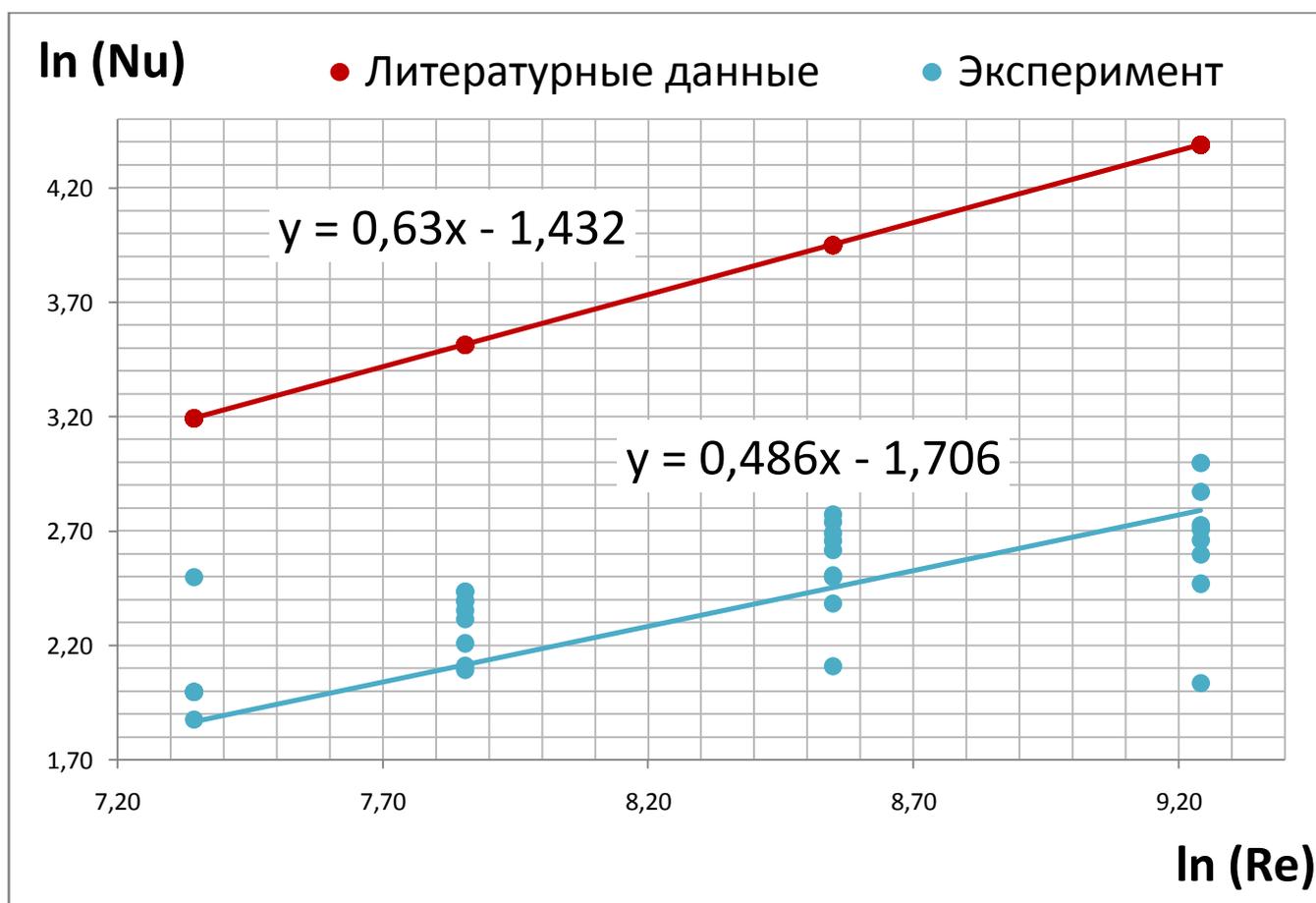


Рисунок 14 - зависимость критерия Нуссельта от числа Рейнольдса при вынужденном обтекании горизонтального трубного пучка

По полученным значениям α были подсчитаны критерии Nu и Re , а также построен график (рисунок 14) в координатах $\ln(Nu) - \ln(Re)$.

Как видно, зависимость имеет линейный характер. И может быть описана уравнением:

$$\ln Nu = \ln C - m \cdot \ln Re.$$

Отсюда $c = 0,18$; $m = 0,48$. Следовательно, искомая критериальная зависимость примет вид:

$$Nu = 0,18 Re^{0,48}.$$

Данная формула справедлива в интервале $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$. Однако, она не описывает теплоотдачу всего пучка в целом. Значения коэффициента α для третьего ряда выше, чем для второго, а для второго - выше, чем для первого.

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докцм.	Подпись	Дата		52

6.2 Исследование теплоотдачи от пучка труб при естественной конвекции

Общее количество тепла, которое отдает каждая трубка с поверхности за счет конвекции:

$$Q = \frac{U_{нагр}^2}{R} = \frac{(5)^2}{20} = 1,25 \text{ Вт}, \quad (6.2.1)$$

где $U_{нагр}$ – напряжение на нагревателе

R – сопротивление нагревателя

Вычислим средний по поверхности цилиндра коэффициент теплоотдачи конвекцией без учета потерь на излучение:

$$\alpha = \frac{Q}{(t_c - t_0)F} = \frac{1,25}{(30,7 - 25) \cdot 0,022} = 9,96 \text{ Вт/м}^2\text{К} \quad (6.2.2)$$

где t_c – температура стенки образца

t_0 – температура окружающей среды

F - площадь боковой поверхности цилиндра;

$$F = \pi \cdot d \cdot l = 3,14 \cdot 0,025 \cdot 0,28 = 0,022 \text{ м}^2$$

Находим критерий Нуссельта по данным экспериментального исследования:

$$Nu_{расч} = \alpha \cdot \frac{d}{\lambda_{воз}} = \frac{9,96}{0,0263} = 9,47 \quad (6.2.3)$$

Где d - диаметр цилиндра

$\lambda_{воз}$ - коэффициент теплопроводности воздуха

Находим критерий подъемной силы Грасгофа и критерий физических свойств Прандтля:

$$Gr = \frac{g \beta d^3 (T_{II} - T_{I})}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot \left(\frac{1}{300}\right) \cdot 0,025^3 \cdot (30,7 - 25)}{1,56 \cdot 10^{-8}} = 11967, \quad (6.2.4)$$

где

ν - коэффициент кинематической вязкости

g - ускорение силы тяжести, м/с^2 .

$$Pr = \frac{\nu}{a} = 0,705.$$

Находим критерий Нуссельта по литературным данным:

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^m = 5,17, \quad (6.2.5)$$

где $c = 0,54$, а $m = 0,25$

Вычислим средний по поверхности цилиндра коэффициент теплоотдачи конвекцией с учетом потерь на излучение:

$$\alpha_{\text{изл}} = \frac{Q - Q_{\text{из}}}{(t_c - t_0)F} = \frac{1,25 - 0,422}{(30 - 25) \cdot 0,022} = 7,23, \quad (6.2.6)$$

$Q_{\text{из}}$ - поправка на излучение, которая может быть вычислена по формуле:

$$Q_{\text{из}} = \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_0^4) F = 0,6 \cdot 5,67 \cdot 10^8 (303 - 278) \cdot 0,022 = 0,422 \text{ Вт}, \quad (6.2.7)$$

здесь ε - степень черноты поверхности цилиндра

$$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4;$$

T_c и T_0 - абсолютные температуры поверхности цилиндра и набегающего потока воздуха.

Имея $\alpha_{\text{изл}}$, вычисляют средний критерий Нуссельта, учитывая потери на излучение:

$$Nu_{\text{изл}} = \alpha_{\text{изл}} \cdot \frac{d}{\lambda_{\text{воз}}} = 7,23 \cdot \frac{0,025}{0,022} = 6,87. \quad (6.2.8)$$

Данные эксперимента представлены в приложение Б.

По полученным значениям α были подсчитаны критерии Nu и Gr , а также построен график (рисунок 15) в координатах $\ln(Nu) - \ln(Gr \cdot Pr)$.

Как видно, зависимость имеет линейный характер. И может быть описана уравнением:

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докum.	Подпись	Дата		54

$$\ln Nu = \ln C - m \cdot \ln Gr.$$

Отсюда $c = 0,42$; $m = 0,299$. Принимаем $m = 0,3$. Следовательно, искомая нами критериальная зависимость примет вид:

$$Nu = 0,42(Gr \cdot Pr)^{0,3}$$

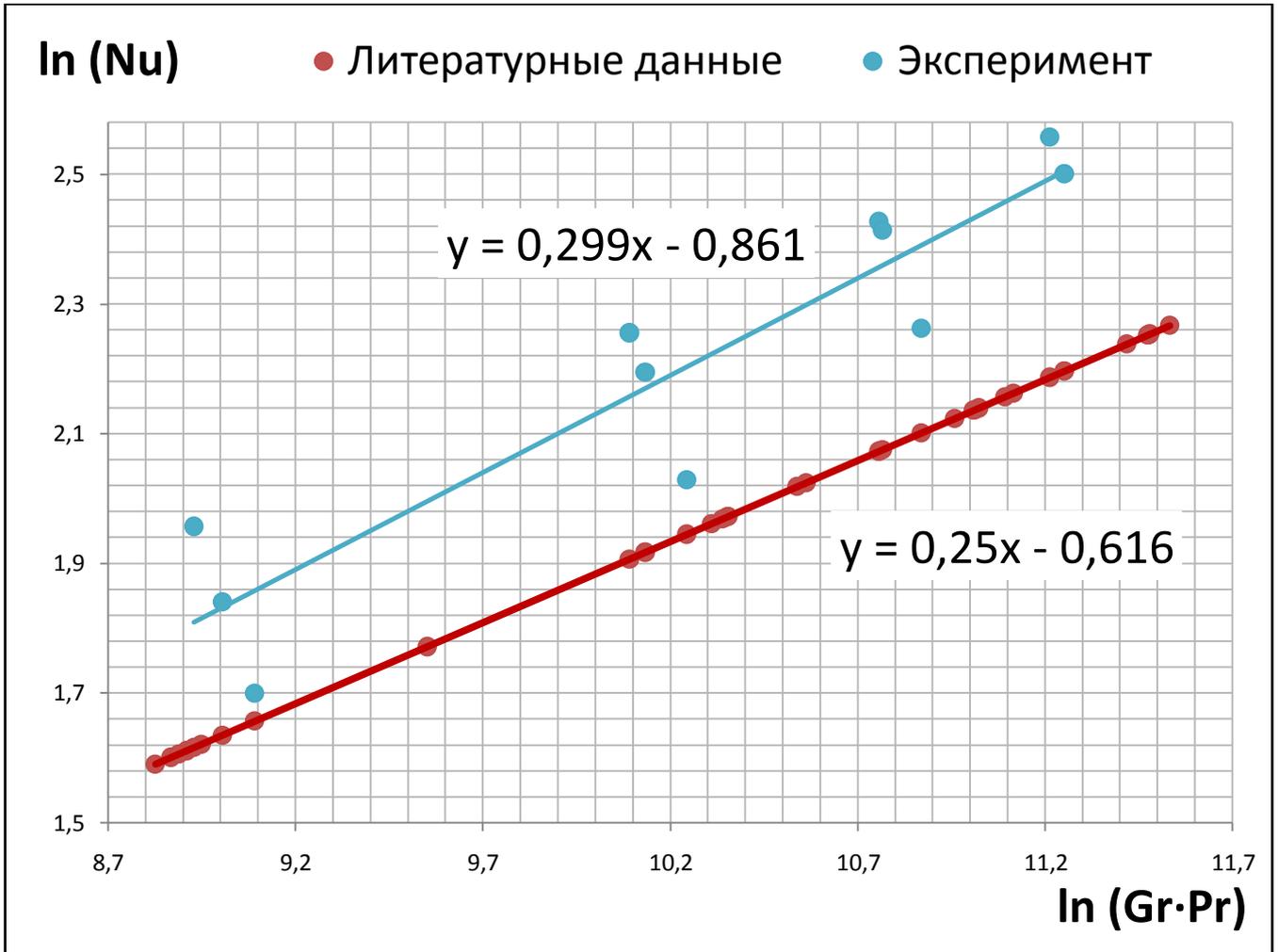


Рисунок 15 - Зависимость критерия Нуссельта от критерия Грасгофа

Изм.	Лист	№ док-им.	Подпись	Дата

ФЮРА. 311600. 001 ПЗ

Лист

55

7 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

7.1 Экономические цели

Изучение особенностей теплоотдачи от трубных пучков является необходимым базисом при решении прикладных вопросов проектирования энергетических установок, при проведении инженерных расчетов и конструировании различной теплотехнической аппаратуры. Разработка данного экспериментального стенда требует определенных человеческих и финансовых вложений в процессе проектирования и монтажа оборудования для проведения эксперимента. Но ее интуитивно понятное устройство наглядно демонстрирует зависимости, изучение которых является одной из приоритетных задач в конструкторских, а также в поверочных расчетах теплообменных аппаратов. Что с одной стороны позволяет достигать ощутимого снижения капитальных затрат за счет экономии материалов для создания теплотехнического оборудования, а с другой стороны повышает эффективность различных теплообменников, труб, поверхностей нагрева.

7.2 График выполнения работ по реализации методики изучения коэффициента теплоотдачи

При водворении в жизнь любого проекта необходимо наиболее оптимальным образом спланировать занятость каждого из участников и сроки выполнения отдельных видов работ.

На начальном этапе составляется полный перечень производимых работ, определяются ответственные лица, а также оптимальное время исполнения. Результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Наиболее удобным, простым и наглядным способом для этих целей является применение линейного графика. Для его построения составим перечень работ с привязкой к исполнителям, продолжительность выполнения этих работ и сведем их в таблицу 1.

					<i>ФЮРА. 311600. 001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						56
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Таблица 1 - Календарный план проекта

Код работы	Вид работы	Продолжительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Исполнители
1	Обзор существующей литературы	10	01.10.2015	10.10.2015	Курганов С.Ю.
2	Математическая постановка задачи	6	11.10.2015	16.10.2015	Курганов С.Ю., Раков Ю.Я
3	Выбор методов	4	17.10.2015	20.10.2015	Курганов С.Ю., Раков Ю.Я
4	Сбор теоретического материала для создания экспериментального стенда	11	21.10.2015	31.10.2015	Курганов С.Ю., Раков Ю.Я
5	Изготовление стенда для исследования теплоотдачи	30	01.11.2015	30.11.2015	Курганов С.Ю., Раков Ю.Я
6	Проведение экспериментов	9	01.12.2015	09.12.2015	Курганов С.Ю.
7	Обработка экспериментальных результатов	12	10.12.2015	21.12.2015	Курганов С.Ю.
8	Создание принципиальной схемы	4	22.12.2015	25.12.2015	Курганов С.Ю., Раков Ю.Я
9	Компоновочный чертеж установки	13	26.12.2015	07.01.2016	Курганов С.Ю., Раков Ю.Я
10	Обработка результатов исследований	12	08.01.2016	19.01.2016	Курганов С.Ю.

Календарный план-график демонстрирует получившийся линейный график работ на основе рассчитанного для дипломанта и научного руководителя времени T_k , кал. дни

Таблица 2 - План-график выполнения проекта

Код работы	Вид работы	Исполнитель	Т _к , кал. дни	Длительность выполнения работ											
				Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Январь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Обзор существующей литературы	Инженер	10	■											
2	Математическая постановка задачи	Инженер, руководитель	6		■										
3	Выбор методов	Инженер, руководитель	4			■									
4	Сбор теоритического материала для создания экспериментального стенда	Инженер, руководитель	11			■	■								
5	Изготовление стенда для исследования теплоотдачи	Инженер, руководитель	30				■	■	■						
6	Проведение экспериментов	Инженер	9							■					
7	Обработка экспериментальных результатов	Инженер	12								■	■			
8	Создание принципиальной схемы	Инженер, руководитель	4									■			
9	Компоновочный чертеж установки	Инженер, руководитель	13										■	■	
10	Обработка результатов исследований	Инженер	12												■

7.3 Расчет стоимости установки

К данной статье расходов относятся стоимость расходных материалов, готовых изделий, заказное оборудование для исследовательских работ и других товарно-материальных ценностей, необходимых для проведения работ по организации эксперимента по изучению теплоотдачи. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим прейскурантам и приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Расходные материалы для установки по измерению коэффициента теплоотдачи

№ п/п	Наименование оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Кол-во единиц оборудования	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1	Измерительная платформа NI cDAQ-9174	73,2	1шт.	73,2
2	Модуль для подключения термопар NI 9211	33,15	1шт.	33,15
3	Уголок стальной 50×50×3	117 руб./м	10 м	1,17
4	Щит мебельный	1700/ кв. м	3 кв. м	5,1
5	Провод установочный ПВ-3, 1×0,75 кв. мм	7 руб./м	30 м	0,21
6	Припой ПОС-61 с канифолью	0,3/м	1 м	0,3
7	Цифровой мультиметр АРРА 305	17444 руб./шт.	1 шт.	17,444
8	Электромеханическое реле 1пер. 48V / 10А, 240VАС	90 руб./шт.	1 шт.	0,09
9	Анемометр «Актаком АТТ-1006»	23,9	1шт	23,9
10	ИТОГО:			154,564

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата

ФЮРА. 311600. 001 ПЗ

Лист

59

7.3.1 Расчет полной заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и дипломанта, а также ежемесячные премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_D}, \quad (7.1)$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 48 дней $M = 10,4$ месяца, 6 - дневная неделя;

F_D – действительный годовой фонд рабочего времени

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 4. Также был принят во внимание коэффициент, учитывающий коэффициент по премиям $K_{\text{ПР}} = 1,2$ и районный коэффициент $K_{\text{РК}} = 1,3$; ($K = 1 \cdot K_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{РК}} = 1 \cdot 1,2 \cdot 1,3 = 1,56$).

Таблица 4 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
Научный руководитель	23264	826,5	33	1,56	42548
Итого:					42548

Помимо фонда основной заработной платы формируется фонд дополнительной заработной платы, из которого осуществляется оплата очередных отпусков и другие выплаты, не связанные с рабочим временем. Фонд дополнительной заработной платы обычно определяется в процентах

									Лист
									60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА. 311600. 001 ПЗ				

(8-10%) от фонда основной заработной платы:

$$C_{\text{доп}} = (0,08...0,1) \cdot C_{\text{осн}} = 0,1 \cdot 42548 = 4255 \text{ руб.}$$

Таким образом, затраты на полную заработную плату составили:

$$C_{\text{пол}} = C_{\text{осн}} + C_{\text{доп}} = 42548 + 4255 = 46803 \text{ руб.}$$

Накладные расходы составляют 50% от основной заработной платы:

$$C_{\text{н}} = 21274 \text{ руб.}$$

7.3.2 Расчет отчислений от заработной платы

Затраты по этой статье составляют отчисления на социальные нужды.

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$C_{\text{соц}} = K_{\text{соц}} \cdot C_{\text{пол}},$$

где $K_{\text{соц}}$ – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы. Данный коэффициент составляет 30% от затрат на заработную плату и включает в себя:

- отчисления в пенсионный фонд;
- на социальное страхование;
- на медицинское страхование.

Итак, отчисления из заработной платы составили:

$$C_{\text{соц}} = 0,3 \cdot 46803 = 14041 \text{ руб.}$$

7.3.3 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования, а также затраты на электроэнергию, потраченную на освещение. Затраты на электроэнергию при работе оборудования для технологических целей рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{об}} = P_{\text{об}} \cdot \text{Ц}_{\text{э}} \cdot t_{\text{об}}, \quad (7.2)$$

где $\mathcal{E}_{\text{об}}$ – затраты на электроэнергию, потребляемую оборудованием, руб.;

$P_{\text{об}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

										Лист
										61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА. 311600. 001 ПЗ					

$C_{\text{Э}}$ – тарифная цена за 1 кВт·час, $C_{\text{Э}} = 1,8$ руб./кВт·час;

$t_{\text{ОБ}}$ – время работы оборудования, час.

Время работы оборудования вычисляется на основе данных для $T_{\text{РД}}$ таблицы 5 для инженера из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{УСТ.ОБ}} \cdot K_{\text{С}}, \quad (7.3)$$

где $P_{\text{УСТ.ОБ}}$ – установленная мощность оборудования, кВт;

$K_{\text{С}}$ – коэффициент спроса, зависящий от количества, загрузки групп приемников, для технологического оборудования малой мощности $K_{\text{С}} = 1$.

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Затраты на электроэнергию для технологических целей

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$, кВт	Затраты $\text{Э}_{\text{ОБ}}$, руб.
Электропаяльник	36	0,04	2,6
Компрессор	24	2,2	95
Освещение	464	1,2	1002
Итого:			1099

7.3.4 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет сметы затрат на разработку, можно определить общую стоимость разработки проекта.

Таблица 6 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
1 Материалы и покупные изделия	$C_{\text{МАТ}}$	154564
2 Полная заработная плата	$C_{\text{ПОЛ}}$	46803
3 Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{СОЦ}}$	14041
4 Расходы на электроэнергию	Э	1099
5 Накладные расходы	$C_{\text{Н}}$	21274
6 Итого:		236504

Таким образом, расходы на разработку составили $C = 236504$ руб.

7.3.5 НДС

НДС составляет 18% от суммы затрат на разработку. Сумма НДС составила 42570руб.

7.3.6 Полная смета затрат на выполнение НИР

Полная смета затрат приведена в таблице 7

Таблица 7 – Полная смета затрат.

	Наименование статьи	Затраты, руб.
1	Материалы и покупные изделия	142364
2	Основная заработная плата	42548
3	Дополнительная заработная плата	4255
4	Отчисления в социальные фонды	14041
5	Расходы на электроэнергию	1099
6	Накладные расходы	21274
7	Общая себестоимость проекта	225581
8	НДС	42570
9	Цена разработки	268151

Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата

ФЮРА. 311600. 001 ПЗ

Лист

63

8 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

8.1 Описание рабочего места

Проектируемым рабочим местом является лаборатория теплофизических исследований, в которой установлен экспериментальный стенд для исследования теплоотдачи.

Одна из основных задач анализа условий труда в лаборатории - организация рабочего пространства, которая заключается в выполнении ряда мероприятий, обеспечивающих рациональный и безопасный трудовой процесс и эффективное использование орудий и предметов труда, что повышает производительность и способствует снижению утомляемости работающих. Удобное и рациональное расположение органов управления позволяет исключить лишние движения.

Главными элементами проектируемой установки являются передвижной стенд с теплообменным аппаратом и компрессором, а также персональный компьютер.

При проектировании экспериментального стенда в лаборатории должны быть соблюдены следующие основные условия:

- достаточное рабочее пространство, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения;
- правильное естественное и искусственное освещение для выполнения поставленных задач;
- соблюдение нормированного микроклимата помещения;
- уровень акустического шума не должен превышать допустимого значения;
- электромагнитные поля, возникающие в процессе эксплуатации электроустановок не должны превышать установленных пороговых значений.

8.2 Производственная санитария

Микроклимат помещения

Согласно СанПиН 2.2.4.548–96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений», для создания нормальных условий труда в производственных помещениях необходимо обеспечить в помещении оптимальные и допустимые микроклиматические условия.

Оптимальные микроклиматические условия – сочетания количественных показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают сохранение нормального теплового состояния организма без напряжения механизмов терморегуляции. Они обеспечивают ощущение теплового комфорта и создают предпосылки для высокого уровня работоспособности.

Допустимые микроклиматические условия – сочетания количественных показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызывать преходящие и быстро нормализующиеся изменения теплового состояния организма, сопровождающиеся напряжением механизмов терморегуляции, не выходящим за пределы физиологических приспособительных возможностей. При этом не возникает повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут наблюдаться дискомфортные теплоощущения, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности.

Допустимые микроклиматические условия допускаются в случаи, если оптимальные не могут быть достигнуты.

К показателям микроклимата относятся:

- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового излучения.

Приведем в таблицы 8 оптимальные и допустимые нормы температуры,

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ док.им.	Подпись	Дата		65

относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений.

Таблица 8 - Оптимальные и допустимые показатели микроклимата производственных помещений

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Оптимальные значения				
Холодный	19-21	18-22	40-60	0,2
Теплый	20-22	19-23	40-60	0,2
Допустимые значения				
Холодный	17-18,9	16-24	15-75	0,1
Теплый	18-19,9	17-28	15-75	0,1

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.) должны соответствовать значениям, приведенным в таблицы 9.

Таблица 9 - Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от производственных источников

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/кв. м, не более
50 и более	35
25 - 50	70
не более 25	100

Требуемое состояние микроклимата рабочей зоны может быть обеспечено при использовании:

- защиты от источников тепловых излучений для снижения температуры воздуха в помещении и теплового облучения работающих;
- устройство вентиляции и отопления;
- применение средств индивидуальной защиты.

В нашем случае значения температур воздуха и поверхностей, а также скорости ветра в лаборатории соответствуют оптимальным значениям. Интенсивность теплового излучения также находится в допустимых пределах.

Влияние шума на организм человека

Согласно ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» в помещениях лабораторий для проведения экспериментальных работ уровень шума не должен превышать 75 дБ.

Чтобы узнать соответствует ли уровень шума требованиям, проведем необходимые расчеты.

Основными источниками шума в лабораторной установке является компрессор для продувки воздуха через теплообменный участок. Приведем уровень шума в таблицу 10.

Таблица 10 – Уровень шума комплектующих установки

Источник шума	Уровень шума, дБ	Звуковое давление, Па
Компрессор	61	0,224

Основной характеристикой звукового поля является уровень его звукового давления N . Оно вычисляется по формуле:

$$N = \frac{20 \lg p}{p_0},$$

где: p – эффективное звуковое давление дин/см²;

$p_0 = 2 \cdot 10^4$ Па – звуковое давление принятое за нулевой уровень.

Вычислим эффективное звуковое давление p_i :

$$p_i = 10^{\frac{N_i}{20}} \cdot p_0,$$

где N_i и p_i параметры i -го источника шума, а $i=1, 2, \dots, n$.

Звуковое давление нескольких источников N суммируется по следующей формуле:

$$N = \frac{20 \lg(p_1 + p_2 + \dots + p_n)}{p_0},$$

где N – суммарный уровень звукового давления.

p_1, p_2, p_n – эффективное звуковое давление для каждого значения $N_1, N_2,$

N_n .

Вычисляем общий уровень шума формуле:

$$N = 20 \cdot \lg \frac{0,224}{2 \cdot 10^{-4}} = 60,9 \text{ дБ.}$$

Расчет уровень шума является допустимым.

Методы защиты от шума подразделяются на методы коллективной защиты и средства индивидуальной защиты.

К методам коллективной защиты относятся: снижение шума за счет совершенствования оборудования; изменения направления шума; применение звукоизоляции; рациональная планировка предприятий.

К методам индивидуальной защиты заключается в использовании средств индивидуальной защиты (специальные наушники, беруши).

Освещение проектируемого места

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение помещений оказывает положительные психофизиологические воздействия на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность.

Недостаточность освещенности приводит к напряжению органов зрения, ослабляет внимание, что приводит к преждевременной утомляемости. Избыток

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

освещенности вызывает ощущение рези в глазах и ослеплению. Неправильное направление света на рабочем месте дезориентирует рабочего.

Расчет освещенности рабочего места проводится посредством выбора системы освещения и определения необходимого числа светильников, их типа и размещения. Исходя из этого, рассчитаем параметры искусственного освещения.

Основные требования и значения нормируемой освещенности рабочих поверхностей изложены в СНиП 23-05-95.

Таблица 11– Нормы освещенности на рабочих местах производственных помещений при искусственном освещении

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение		
						Освещенность, лк.		
						При системе комбинированного освещения		При системе общего освещения
						всего	в том числе от общего	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Высокой точности	0,30 0,50	III	б	малый	сред- ний	1000	200	300
				сред- ний	тем- ный	50	200	200

Выбор источника света

Обычно искусственное освещение выполняется посредством электрических источников света двух видов: ламп накаливания и люминесцентных ламп.

Люминесцентные лампы по сравнению с лампами накаливания обладают рядом существенных преимуществ:

- по спектральному составу света близки к естественному дневному свету;
- обладают повышенной светоотдачей, которая в 3-4 раза выше, чем у ламп накаливания;
- обладают более высоким КПД, который в 1,5-2 раза выше, чем КПД ламп накаливания;
- имеют более длительный срок службы.

По спектральному составу видимого света различают лампы дневного света (ЛД), дневного света с улучшенной цветопередачей (ЛДЦ), холодного белого (ЛХБ), тёплого белого (ЛТБ) и белого цвета (ЛБ). Наиболее широко применяются лампы типа ЛБ. При повышенных требованиях к передаче цветов освещением применяются лампы типа ЛХБ, ЛД, ЛДЦ. Лампа типа ЛТБ применяется для правильной цветопередачи человеческого лица.

Наиболее распространёнными типами светильников для люминесцентных ламп являются открытые двухламповые светильники типа ОД, ОДОР, ШОД, ОДО, ООД – для нормальных помещений с хорошим отражением потолка и стен, допускаются при умеренной влажности и запылённости.

Электромагнитное излучение

Электромагнитные поля не ощущаются человеком, однако они оказывают существенное влияние на работоспособность людей так как электромагнитные поля обладают высокой биологической активностью.

Электромагнитная безопасность регулируется государственными стандартами и санитарными правилами и нормами. Согласно СанПиН 2.2.4.723–98 предельно допустимые уровни (ПДУ) электромагнитных полей, устанавливаются в зависимости от времени пребывания персонала для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия. Приведенные значения представлены в таблице 12.

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		70

Таблица 12 – Предельно допустимые уровни ЭМП

Время пребывания (ч)	Допустимые уровни МП, H [А/м]/ B [мкТл]	
	общем	локальном
1	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

Обеспечение защиты работающих от неблагоприятного влияния ЭМП осуществляется путем проведения организационных и технических мероприятий.

К организационным относятся мероприятия, обеспечивающие соблюдение требований ограничения продолжительности пребывания персонала в условиях воздействия ЭМП и организации рабочих мест на расстояниях от токоведущих частей оборудования, соблюдение ПДУ.

К техническим относятся мероприятия, снижающие уровни ЭМП на рабочих местах путем экранирования источников ЭМП или рабочих мест. Экранирование должно осуществляться посредством материалов с высокой магнитной постоянной.

8.3 Техника безопасности

Механический фактор

Механическими опасностями называют такие нежелательные воздействия на человека, происхождение которых обусловлено силами гравитации или кинетической энергией тел.

В помещении лабораторной источниками механических опасностей являются:

- движущиеся части механизмов оборудования;
- неприкрепленное оборудование (материалы, инструменты и т.д.);
- острые углы столов;
- горячие поверхности установки.

Для защиты от механических опасностей рассматривают два основных метода:

- обеспечение недоступности к опасным частям оборудования;
- применение средств индивидуальной защиты (специальная обувь, перчатки, каски, защитные каски).

Электробезопасность

По классификации по опасности поражения электрическим током помещение лаборатории относится ко второму классу — помещения с повышенной опасностью. Это связано с наличием следующих опасных факторов:

- токопроводящих полов (железобетонных);
- возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования — с другой.

Таблица 13 - Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки

Род тока	$U, В$	$I, мА$
	не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Для безопасной работы на электроустановках выполняется ряд организационных мероприятий, которые прописаны в ГОСТ 12.1.019-79:

- к работе на электроустановках допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие инструктаж и обучение безопасным методам труда и не имеющие медицинских противопоказаний;

- назначение лиц, ответственных за организацию и производство работ;
- организация инструктажей.

Так же используются технические способы и средства обеспечения электробезопасности:

- изоляцию токоведущих частей;
- защитное заземление;
- защитное отключение.

Напряжение лабораторной установки регулируется в пределах от 0 до 220 В, максимальный ток 0,5 А.

В связи с этим работа на данной установке требует второй группы допуска по электробезопасности.

Пожарная безопасность

Противопожарная защита имеет своей целью изыскание наиболее эффективных, экономически целесообразных и технически обоснованных способов и средств предупреждения пожаров и их ликвидации с минимальным ущербом при наиболее рациональном использовании сил и технических средств тушения.

Согласно НПБ 105-03 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» помещение лаборатории по взрывопожарной и пожарной опасности относится к категории В. Это связано с наличием горючих жидкостей и твердых материалов .

Для предотвращения возникновения пожара используются следующие меры:

1. Строительно-планировочные;
2. Технические;
3. Организационные.

Строительно-планировочные меры определяются огнестойкостью зданий и сооружений (выбор материалов конструкций: сгораемые,

					<i>ФЮРА. 311600. 001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						73
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

несгораемые, трудно сгораемые) и предел огнестойкости — это количество времени, в течение которого под воздействием огня не нарушается несущая способность строительных конструкций вплоть до появления первой трещины.

Технические меры — это соблюдение противопожарных норм при эвакуации систем вентиляции, отопления, освещения, электрического обеспечения, а так же использование разнообразных защитных систем, соблюдение параметров технологических процессов и режимов работы оборудования.

Организационные меры — обучение персонала по пожарной безопасности, соблюдению мер по пожарной безопасности.

Использование средств пожаротушения. Выбор типа и необходимого количества огнетушителей в защищаемом помещении следует производить в зависимости от их огнетушащей способности, предельной площади, а также класса пожара горючих веществ и материалов. Исходя из этого, и, ориентируясь на НПБ-105-03, было решено использовать углекислотные огнетушители марки ОУ-5 в количестве двух штук.

8.4 Охрана окружающей среды

В процессе проектирования и эксплуатации экспериментальной установки происходит циркуляция воздуха через теплообменный участок. При этом воздух не обогащается какими-либо примесями. Забор и выпуск воздуха происходит в пределах воздушного пространства лаборатории теплотехнических исследований. Жидкостный контур в установке отсутствует, вследствие чего можно сделать вывод, не происходит негативных воздействий на гидросферу. Все твердые отходы, полученные в процессе проектирования, утилизируются как бытовой мусор.

					<i>ФЮРА. 311600. 001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		74

9 АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ОПЫТНОГО УЧАСТКА

В процессе проведения экспериментальных исследований система контроля температуры призвана решить две крайне важные задачи: определение температуры стенки труб для вычисления коэффициента теплоотдачи, а также обеспечение безопасного температурного режима функционирования стенда. Это обусловлено тем, что при конструктивной подготовке стенда применялись припои с относительно невысокой температурой плавления, поэтому верхний температурный предел эксперимента определен как $T^{MAX} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

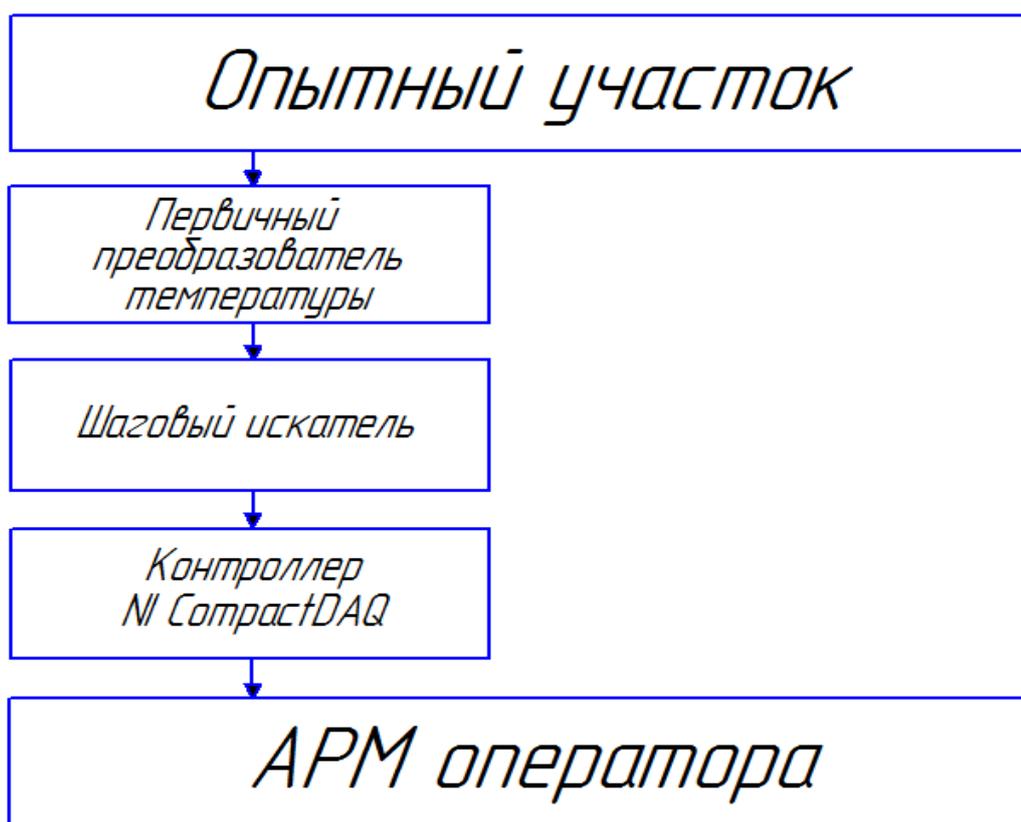


Рисунок 16 - Структурная схема системы контроля температуры

9.1 Краткое описание технологической схемы объекта контроля

Опытный участок представляет собой металлический кожух

поперечного квадратного сечения. Верхняя и нижняя части, в зависимости от вида эксперимента, имеют либо свободное сообщение с атмосферой, либо закрываются присоединяемыми фланцами. По длине рабочего участка располагается девять теплообменных цилиндров, изготовленных из латунных труб наружным диаметром $d=25$ мм и длиной $l=280$ мм, образующих коридорный трубный пучок размером 3×3 . Внутри всех цилиндров расположены электрические нагреватели, выполненные из нихромовой проволоки, которая намотана на керамическую трубку с одинаковым шагом между витками, для обеспечения равномерной плотности теплового потока. Зазор между внутренней стенкой латунной трубы и нагревателем заполнен кварцевым песком. Для уменьшения потерь тепла через торцы цилиндра, на его концах установлены заглушки из асбоцемента. К стенке латунной трубы заподлицо с поверхностью припаяны хромель-копелевые термопары.

Выводы от нагревателей и термоэлектрические провода пропущены, для подсоединения к соответствующим элементам схемы питания и измерения, через торцевые заглушки. Питание нагревателей, включенных параллельно, осуществляется от однофазного регулятора напряжения РНО - 250.

9.2 Методы и средства измерения температуры

Для измерения температуры поверхности труб были выбраны хромель-копелевые термоэлектрические преобразователи, по одному на каждую трубку. Такой выбор обусловлен сравнительно невысокой стоимостью термопар, а также их небольшими габаритами. Измерительный сигнал от них поступает на контакты шагового искателя ШИ 25/4, который под управлением оператора коммутирует термоЭДС на входные клеммы модуля ввода аналоговых сигналов NI 9211. Данный модуль работает в составе контроллера NIcDAQ 9174, соединенного USB-интерфейсом с персональным компьютером. Для контроля температуры на компьютере установлено специализированное программное обеспечение NI Measurement & Automation Explorer (рисунк 16).

					<i>ФЮРА. 311600. 001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						76
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

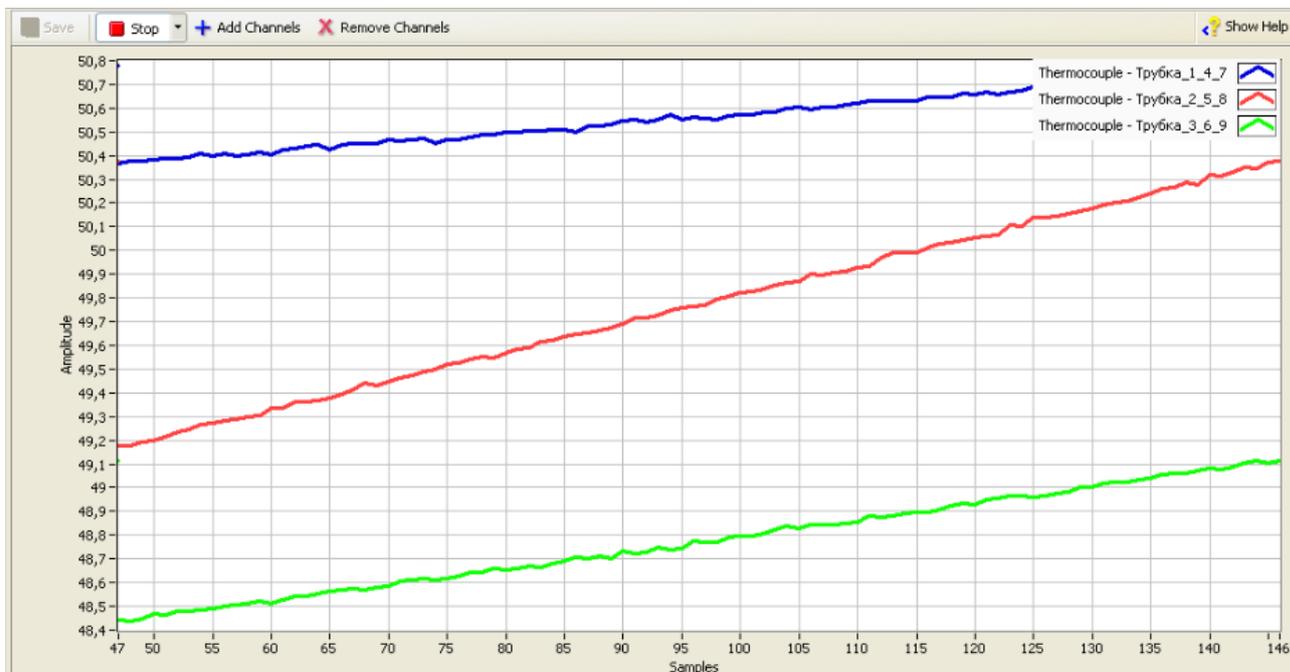


Рисунок 17 - Процесс измерения температуры «NI MAX»

Функциональная схема, а также заказная спецификация приборов автоматизированной системы контроля опытного участка экспериментального стенда приведены на листах:

- ФЮРА.421000.003 С2,
- ФЮРА.421000.003 С01.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных экспериментов были изучены закономерности теплоотдачи от вертикальных пучков горизонтальных труб в условиях вынужденной и свободной конвекции. Результаты хорошо сочетаются с большинством данных, приведенных в различной литературе.

При наличии вынужденного конвективного теплообмена доказана определенная зависимость критерия Nu от величины критерия Re . Для каждого из интервалов чисел Re эта зависимость своя. Из чего можно сделать вывод, что теплоотдача первых двух рядов труб в большей мере определяется скоростью набегающего потока. А к третьему ряду из-за установления в пучке собственной турбулентности происходит стабилизация теплообмена. Теплоотдача третьего ряда выше теплоотдачи второго, а второго ряда выше первого.

В условиях вынужденной конвекции получена критериальная зависимость числа Nu от Gr . Это обусловлено тем, что Gr характеризует интенсивность свободного движения воздуха. Здесь ключевую роль играет относительный шаг трубного пучка. При увеличении шага трубки начинают охлаждаться как одиночный цилиндр. В обоих случаях, ввиду того, что опыты проводились с воздухом, критерий Pr почти не изменялся и оказывал незначительное влияние на теплоотдачу.

										Лист
										78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА. 311600. 001 ПЗ					

Список использованных источников

1. Антуфьев В.М. Теплопередача и аэродинамические сопротивления трубчатых поверхностей в поперечном потоке / В.М. Антуфьев, Г.С. Белецкий - М.: Машгиз, 1948, - 120с.
2. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках / А.А. Жукаускас - М.: Наука, 1982. - 472 с.
3. Жукаускас А.А. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости / А.А. Жукаускас, В. Макарявичус, А. Шланчяускас – Вильнюс: Минтис, 1968. – 192с.
4. Загромов Ю.А. Теплоотдача вертикального ряда горизонтальных труб в условиях свободной конвекции воздуха. // Ю.А. Загромов, Ю.А. Короленко - Изв. Томского политехнического института, 1965, т. 137, с. 52-58.
5. Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи, 2// Ю. Вилемас, Г. Воронин - Вильнюс: Москлас, 1988. - 188 с.
6. Колосов Ю.В., Барановский В.В. Защита от вибраций и шума на производстве. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 38 с.
7. Короленко Ю.А. Теплопередача горизонтального пучка труб к воздуху в условиях свободной конвекции. // Ю.А. Короленко - Изв. Томского политехнического института, 1962, т. 110, с. 26-33.
8. Мартыненко О.Г. Свободно-конвективный теплообмен: Справочник / О.Г. Мартыненко, Ю.А. Соковишин - МН.: Наука и техника, 1982 -400 с.
9. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева - М.: Энергия, 1977. - 344 с.
10. Практикум по теплопередаче: Учеб. пособие для Вузов / А.П. Солодов, Ф.Ф. Цветков, А.В. Елисеев, В.А. Осипова - М.: Энергоатомиздат, 1986 - 296 с.
11. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена/ В.А. Осипова - М.: Энергия, 1979 -320 с.
12. Цветков Ф.Ф. Теплообмен / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. - М.:

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		79

Издательский дом МЭИ, 2011. - 562 с.

13. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. / Б.Н. Юдаев - М.: Высшая школа, 1988. - 479 с.

					ФЮРА. 311600. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ док.м.	Подпись	Дата		80

Приложение А

Таблица А.1 - Данные исследования вынужденной конвекции

№ трубки	$U_{\text{пит}}, \text{V}$	$t_{\text{ос}}, ^\circ\text{C}$	$R, \text{ом}$	$Q, \text{Вт}$	$t_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	$F, \text{м}^2$	$\alpha, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$d, \text{м}$
1	5	45	20	1,25	47	0,022	28,41	0,025
	10	45	20	5	59	0,022	16,23	0,025
	15	45	20	11,25	71,4	0,022	19,37	0,025
	20	45	20	20	94	0,022	18,55	0,025
2	5	45	20	1,25	46	0,022	56,82	0,025
	10	45	20	5	60,9	0,022	14,29	0,025
	15	45	20	11,25	76	0,022	16,50	0,025
	20	45	20	20	95,6	0,022	17,97	0,025
3	5	45	20	1,25	47,3	0,022	24,70	0,025
	10	45	20	5	61,9	0,022	13,45	0,025
	15	45	20	11,25	82	0,022	13,82	0,025
	20	45	20	20	110	0,022	13,99	0,025
4	5	45	20	1,25	51,9	0,022	8,23	0,025
	10	45	20	5	59,4	0,022	15,78	0,025
	15	45	20	11,25	70,6	0,022	19,98	0,025
	20	45	20	20	89,4	0,022	20,48	0,025
5	5	45	20	1,25	46,7	0,022	33,42	0,025
	10	45	20	5	59,8	0,022	15,36	0,025
	15	45	20	11,25	73,6	0,022	17,88	0,025
	20	45	20	20	91,4	0,022	19,59	0,025
6	5	45	20	1,25	50	0,022	11,36	0,025
	10	45	20	5	62,1	0,022	13,29	0,025
	15	45	20	11,25	81,8	0,022	13,90	0,025
	20	45	20	20	110	0,022	13,99	0,025
7	5	45	20	1,25	52,8	0,022	7,28	0,025
	10	45	20	5	58,6	0,022	16,71	0,025
	15	45	20	11,25	69,1	0,022	21,22	0,025
	20	45	20	20	87,4	0,022	21,44	0,025
8	5	45	20	1,25	45,9	0,022	63,13	0,025
	10	45	20	5	58,6	0,022	16,71	0,025
	15	45	20	11,25	68,5	0,022	21,76	0,025
	20	45	20	20	83,1	0,022	23,86	0,025
9	5	45	20	1,25	53	0,022	7,10	0,025
	10	45	20	5	59	0,022	16,23	0,025
	15	45	20	11,25	70	0,022	20,45	0,025
	20	45	20	20	88	0,022	21,14	0,025

Продолжение таблицы А.1

№ трубки	w	Pr	Re	Nu экс	c	m	m2	Nu расч
1	1,2	0,71	1546	27,00	0,24	0,63	0,36	24,38
	2	0,71	2577	15,43	0,24	0,63	0,36	33,64
	4	0,71	5155	18,41	0,24	0,63	0,36	52,06
	8	0,71	10309	17,64	0,24	0,63	0,36	80,57
2	1,2	0,71	1546	54,01	0,24	0,63	0,36	24,38
	2	0,71	2577	13,59	0,24	0,63	0,36	33,64
	4	0,71	5155	15,68	0,24	0,63	0,36	52,06
	8	0,71	10309	17,08	0,24	0,63	0,36	80,57
3	1,2	0,71	1546	23,48	0,24	0,63	0,36	24,38
	2	0,71	2577	12,78	0,24	0,63	0,36	33,64
	4	0,71	5155	13,14	0,24	0,63	0,36	52,06
	8	0,71	10309	13,29	0,24	0,63	0,36	80,57
4	1,2	0,71	1546	7,83	0,24	0,63	0,36	24,38
	2	0,71	2577	15,00	0,24	0,63	0,36	33,64
	4	0,71	5155	18,99	0,24	0,63	0,36	52,06
	8	0,71	10309	19,46	0,24	0,63	0,36	80,57
5	1,2	0,71	1546	31,77	0,24	0,63	0,36	24,38
	2	0,71	2577	14,60	0,24	0,63	0,36	33,64
	4	0,71	5155	17,00	0,24	0,63	0,36	52,06
	8	0,71	10309	18,62	0,24	0,63	0,36	80,57
6	1,2	0,71	1546	10,80	0,24	0,63	0,36	24,38
	2	0,71	2577	12,63	0,24	0,63	0,36	33,64
	4	0,71	5155	13,21	0,24	0,63	0,36	52,06
	8	0,71	10309	13,29	0,24	0,63	0,36	80,57
7	1,2	0,71	1546	6,92	0,24	0,63	0,36	24,38
	2	0,71	2577	15,89	0,24	0,63	0,36	33,64
	4	0,71	5155	20,17	0,24	0,63	0,36	52,06
	8	0,71	10309	20,38	0,24	0,63	0,36	80,57
8	1,2	0,71	1546	60,01	0,24	0,63	0,36	24,38
	2	0,71	2577	15,89	0,24	0,63	0,36	33,64
	4	0,71	5155	20,68	0,24	0,63	0,36	52,06
	8	0,71	10309	22,68	0,24	0,63	0,36	80,57
9	1,2	0,71	1546	6,75	0,24	0,63	0,36	24,38
	2	0,71	2577	15,43	0,24	0,63	0,36	33,64
	4	0,71	5155	19,44	0,24	0,63	0,36	52,06
	8	0,71	10309	20,10	0,24	0,63	0,36	80,57

Продолжение таблицы А.1

№ трубки	Ln(Nu экс)	Ln(RE)	Ln(Nu расч)	α изл	Q изл	Nu изл	Ln(Nu изл)
1	3,30	7,34	3,19	23,99	0,19	22,81	2,00
	2,74	7,85	3,52	11,56	1,44	10,99	2,40
	2,91	8,55	3,95	14,42	2,88	13,71	2,62
	2,87	9,24	4,39	13,06	5,92	12,41	3,00
2	3,99	7,34	3,19	52,42	0,10	49,83	2,00
	2,61	7,85	3,52	9,58	1,65	9,11	2,21
	2,75	8,55	3,95	11,44	3,45	10,87	2,39
	2,84	9,24	4,39	12,43	6,16	11,82	2,47
3	3,16	7,34	3,19	20,28	0,22	19,28	2,00
	2,55	7,85	3,52	8,71	1,76	8,28	2,11
	2,58	8,55	3,95	8,62	4,23	8,19	2,50
	2,59	9,24	4,39	8,08	8,45	7,68	3,00
4	2,06	7,34	3,19	3,71	0,69	3,53	1,00
	2,71	7,85	3,52	11,10	1,48	10,55	2,36
	2,94	8,55	3,95	15,04	2,78	14,30	2,66
	2,97	9,24	4,39	15,09	5,26	14,35	2,66
5	3,46	7,34	3,19	29,01	0,16	27,58	2
	2,68	7,85	3,52	10,67	1,53	10,14	2,32
	2,83	8,55	3,95	12,88	3,15	12,24	2,50
	2,92	9,24	4,39	14,16	5,54	13,46	2,60
6	2,38	7,34	3,19	6,88	0,49	6,54	1,88
	2,54	7,85	3,52	8,55	1,78	8,13	2,10
	2,58	8,55	3,95	8,70	4,21	8,27	2,11
	2,59	9,24	4,39	8,08	8,45	7,68	2,04
7	1,94	7,34	3,19	2,74	0,78	2,61	0,96
	2,77	7,85	3,52	12,05	1,40	11,45	2,44
	3,00	8,55	3,95	16,32	2,60	15,51	2,74
	3,01	9,24	4,39	16,11	4,97	15,31	2,73
8	4,09	7,34	3,19	58,74	0,09	55,83	2,50
	2,77	7,85	3,52	12,05	1,40	11,45	2,44
	3,03	8,55	3,95	16,87	2,53	16,04	2,78
	3,12	9,24	4,39	18,63	4,38	17,71	2,87
9	1,91	7,34	3,19	2,56	0,80	2,43	0,89
	2,74	7,85	3,52	11,56	1,44	10,99	2,40
	2,97	8,55	3,95	15,53	2,71	14,77	2,69
	3,00	9,24	4,39	15,80	5,06	15,01	2,71

Приложение Б

Таблица Б1 - Данные исследования естественной конвекции

№ трубки	U _{пит.} , V	t _{ос.} , °C	R, ом	Q, Вт	t _{п.} , °C	F, м ²	α, Вт/м ² ·К	d, м
1	5	25	20	1,25	30,2	0,022	10,93	0,025
	10	25	20	5	46,2	0,022	10,72	0,025
	15	25	20	11,25	65,9	0,022	12,50	0,025
	20	25	20	20	90	0,022	13,99	0,025
2	5	25	20	1,25	30	0,022	11,36	0,025
	10	25	20	5	51,1	0,022	8,71	0,025
	15	25	20	11,25	70,4	0,022	11,26	0,025
	20	25	20	20	90	0,022	13,99	0,025
3	5	25	20	1,25	29,8	0,022	11,84	0,025
	10	25	20	5	46,2	0,022	10,72	0,025
	15	25	20	11,25	66,4	0,022	12,35	0,025
	20	25	20	20	90,3	0,022	13,92	0,025
4	5	25	20	1,25	29,9	0,022	11,60	0,025
	10	25	20	5	45,3	0,022	11,20	0,025
	15	25	20	11,25	63,8	0,022	13,18	0,025
	20	25	20	20	86,4	0,022	14,81	0,025
5	5	25	20	1,25	34,5	0,022	5,98	0,025
	10	25	20	5	50,5	0,022	8,91	0,025
	15	25	20	11,25	69,4	0,022	11,52	0,025
	20	25	20	20	93,9	0,022	13,19	0,025
6	5	25	20	1,25	29,6	0,022	12,35	0,025
	10	25	20	5	45,9	0,022	10,87	0,025
	15	25	20	11,25	65,8	0,022	12,53	0,025
	20	25	20	20	90	0,022	13,99	0,025
7	5	25	20	1,25	31	0,022	9,47	0,025
	10	25	20	5	41,3	0,022	13,94	0,025
	15	25	20	11,25	56,7	0,022	16,13	0,025
	20	25	20	20	77	0,022	17,48	0,025
8	5	25	20	1,25	30,5	0,022	10,33	0,025
	10	25	20	5	44	0,022	11,96	0,025
	15	25	20	11,25	60,5	0,022	14,40	0,025
	20	25	20	20	77	0,022	17,48	0,025
9	5	25	20	1,25	30,1	0,022	11,14	0,025
	10	25	20	5	42	0,022	13,37	0,025
	15	25	20	11,25	57	0,022	15,98	0,025
	20	25	20	20	75	0,022	18,18	0,025

Продолжение таблицы Б.1

№ трубки	Pr	Gr·Pr	c	m	Gr	Nu расч.	Ln (Nu экс)
1	0,705	7697	0,54	0,25	10917	5,06	2,34
	0,705	31379	0,54	0,25	44510	7,19	2,32
	0,705	60538	0,54	0,25	85870	8,47	2,48
	0,705	96210	0,54	0,25	136468	9,51	2,59
2	0,705	7401	0,54	0,25	10498	5,01	2,38
	0,705	38632	0,54	0,25	54797	7,57	2,11
	0,705	67199	0,54	0,25	95318	8,69	2,37
	0,705	96210	0,54	0,25	136468	9,51	2,59
3	0,705	7105	0,54	0,25	10078	4,96	2,42
	0,705	31379	0,54	0,25	44510	7,19	2,32
	0,705	61278	0,54	0,25	86920	8,50	2,46
	0,705	96654	0,54	0,25	137098	9,52	2,58
4	0,705	7253	0,54	0,25	10288	4,98	2,40
	0,705	30047	0,54	0,25	42620	7,11	2,36
	0,705	57430	0,54	0,25	81461	8,36	2,53
	0,705	90882	0,54	0,25	128910	9,38	2,64
5	0,705	14061	0,54	0,25	19945	5,88	1,74
	0,705	37744	0,54	0,25	53538	7,53	2,14
	0,705	65719	0,54	0,25	93218	8,65	2,39
	0,705	101983	0,54	0,25	144656	9,65	2,53
6	0,705	6809	0,54	0,25	9658	4,91	2,46
	0,705	30935	0,54	0,25	43880	7,16	2,34
	0,705	60390	0,54	0,25	85660	8,47	2,48
	0,705	96210	0,54	0,25	136468	9,51	2,59
7	0,705	8881	0,54	0,25	12597	5,24	2,20
	0,705	24127	0,54	0,25	34222	6,73	2,58
	0,705	46921	0,54	0,25	66555	7,95	2,73
	0,705	76968	0,54	0,25	109175	8,99	2,81
8	0,705	8141	0,54	0,25	11547	5,13	2,28
	0,705	28123	0,54	0,25	39891	6,99	2,43
	0,705	52546	0,54	0,25	74533	8,18	2,62
	0,705	76968	0,54	0,25	109175	8,99	2,81
9	0,705	7549	0,54	0,25	10708	5,03	2,36
	0,705	25163	0,54	0,25	35692	6,80	2,54
	0,705	47365	0,54	0,25	67184	7,97	2,72
	0,705	74008	0,54	0,25	104976	8,91	2,85

Продолжение таблицы Б.1

№ трубки	$\text{Ln}(\text{Gr} \cdot \text{Pr})$	$\text{Ln}(\text{Nu лит})$	$\alpha_{\text{изл}}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	$Q_{\text{изл}}, \text{Вт}$	Nu изл	$\text{Ln}(\text{Nu изл})$
1	8,95	1,62	7,23	0,42	6,87	1,93
	10,35	1,97	6,72	1,87	6,38	1,85
	11,01	2,14	8,09	3,97	7,69	2,04
	11,47	2,25	9,03	7,09	8,58	2,15
2	8,91	1,61	7,67	0,41	7,29	1,99
	10,56	2,02	4,61	2,36	4,38	1,48
	11,12	2,16	6,75	4,51	6,42	1,86
	11,47	2,25	9,03	7,09	8,58	2,15
3	8,87	1,60	8,15	0,39	7,75	2,05
	10,35	1,97	6,72	1,87	6,38	1,85
	11,02	2,14	7,93	4,03	7,54	2,02
	11,48	2,25	8,95	7,14	8,51	2,14
4	8,89	1,61	7,90	0,40	7,51	2,02
	10,31	1,96	7,21	1,78	6,85	1,92
	10,96	2,12	8,81	3,73	8,38	2,13
	11,42	2,24	9,93	6,59	9,44	2,24
5	9,55	1,77	2,20	0,79	2,09	0,74
	10,54	2,02	4,82	2,29	4,58	1,52
	11,09	2,16	7,03	4,38	6,68	1,90
	11,53	2,27	8,14	7,66	7,74	2,05
6	8,83	1,59	8,67	0,37	8,24	2,11
	10,34	1,97	6,88	1,84	6,54	1,88
	11,01	2,14	8,12	3,96	7,72	2,04
	11,47	2,25	9,03	7,09	8,58	2,15
7	9,09	1,66	5,76	0,49	5,47	1,70
	10,09	1,91	10,04	1,40	9,54	2,26
	10,76	2,07	11,91	2,94	11,32	2,43
	11,25	2,20	12,82	5,33	12,19	2,50
8	9,00	1,63	6,63	0,45	6,30	1,84
	10,24	1,94	8,00	1,66	7,61	2,03
	10,87	2,10	10,11	3,36	9,61	2,26
	11,25	2,20	12,82	5,33	12,19	2,50
9	8,93	1,62	7,45	0,41	7,08	1,96
	10,13	1,92	9,45	1,47	8,98	2,20
	10,77	2,08	11,76	2,97	11,18	2,41
	11,21	2,19	13,57	5,07	12,90	2,56