

**ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ГАЗПРОМ ТЕХНИКУМ НОВЫЙ УРЕНГОЙ»**

**Сборник методических указаний**

по выполнению лабораторных работ

по МДК 01.01. «Технологическое оборудование и коммуникации»

ПМ.01 «Эксплуатация технологического оборудования»

программы подготовки специалистов среднего звена

18.02.09 Переработка нефти и газа

Новый Уренгой 2017

Методические указания для выполнения лабораторных работ разработаны в соответствии рабочей программой профессионального модуля ПМ.01. Эксплуатация технологического оборудования на основе ФГОС СПО по специальности 18.02.09 «Переработка нефти и газа» и содержат требования по подготовке, выполнению и оформлению результатов лабораторных работ.

Сборник методических указаний по выполнению лабораторных работ адресован студентам очной формы обучения.

#### РАЗРАБОТЧИКИ:

Л.А. Коростылева – преподаватель профессионального цикла высшей категории

А.А. Гарейшина – преподаватель профессионального цикла высшей категории

А. С. Блинцова – преподаватель ЧПОУ «Газпром Техникум Новый Уренгой»

Данные методические указания

являются собственностью

© ЧПОУ «Газпром техникум Новый Уренгой»

Рассмотрено на заседании ПЦК/кафедры и рекомендовано к применению

Протокол № 5 от « 10 » 01 2017 г.

Председатель/заведующий

Рад. А.А. Гарейшина И.О.Ф.

Зарегистрированы в реестре банка программной, оценочной и учебно-методической документации.

Регистрационный номер 144.МЧ/10. ПМ.01. КИР.  
001-17

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Правила поведения и техника безопасности при проведении лабораторных работ.....	7
2 Первая помощь при несчастных случаях.....	11
3 Порядок выполнения лабораторных работ.....	13
4 Защита лабораторной работы.....	14
5 Критерии оценки лабораторной работы.....	16
6 Лабораторная работа №1 Последовательная и параллельная работа центробежных насосов на сеть.....	19
Лабораторная работа №2 Определение режима течения воды в цилиндрической трубе круглого сечения.....	25
Лабораторная работа №3 Определение потерь напора в прямой трубе круглого сечения.....	31
Лабораторная работа №4 Изучение теплообмена в теплообменнике типа «труба в трубе».....	38
Лабораторная работа №5 Изучение теплообмена в теплообменнике с плавающей головкой.....	54
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	70
Список используемых источников.....	74
Лист согласования.....	77

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Уважаемый студент!**

Сборник методических указаний по выполнению лабораторных работ по МДК 01. 01. «Технологическое оборудование и коммуникации» для выполнения практических работ созданы Вам в помощь для работы на занятиях, подготовки к лабораторным работам и правильного составления отчетов.

Приступая к выполнению лабораторной работы, Вы должны внимательно прочитать цель занятия, ознакомиться с требованиями к уровню Вашей подготовки в соответствии с федеральными государственными стандартами третьего поколения (ФГОС-3), краткими теоретическими и учебно-методическими материалами по теме практической работы ответить на вопросы для закрепления теоретического материала.

Все задания к лабораторной работе Вы должны выполнять в соответствии с инструкцией, анализировать полученные в ходе занятия результаты по приведенной методике.

Отчет о лабораторной работе Вы должны выполнить по приведенной форме, опираясь на образец.

Наличие положительной оценки по лабораторным работам необходимо для получения зачета по МДК и допуска к экзамену, поэтому в случае отсутствия на уроке по любой причине или получения неудовлетворительной оценки за лабораторную работу Вы должны найти время для ее выполнения или пересдачи.

Выполнение лабораторных работ направлено на достижение следующих **целей**:

- обобщение, систематизация, углубление, закрепление полученных теоретических знаний;

- формирование умений, получение первоначального практического опыта по выполнению профессиональных задач в соответствии с требованиями к результатам освоения профессионального модуля. Освоенные на практических занятиях умения в совокупности с усвоенными знаниями и полученным практическим опытом при прохождении учебной и производственной практики формируют профессиональные компетенции;

- совершенствование умений применять полученные знания на практике, реализация единства интеллектуальной и практической деятельности;

- выработка при решении поставленных задач таких профессионально значимых качеств, как творческая инициатива, самостоятельность, ответственность, способность работать в команде и брать на себя ответственность за работу всех членов команды, способность к саморазвитию и самореализации, которые соответствуют общим компетенциям, перечисленным в ФГОС СПО.

Предусмотрено проведение:

- 4 часов для выполнения лабораторной работы №1 **«Последовательная и параллельная работа центробежных насосов на сеть»;**
- 2 часов для выполнения лабораторной работы № 2 **«Определение режима течения воды в цилиндрической трубе круглого сечения»;**
- 4 часов для выполнения лабораторной работы №3 **«Определение потерь напора в прямой трубе круглого сечения»;**
- 2 часов для выполнения лабораторной работы № 4 **«Изучение теплообмена в теплообменнике типа «труба в трубе»;**
- 2 часов для выполнения лабораторной работы № 5 **«Изучение теплообмена в теплообменнике с плавающей головкой»**

для очной формы обучения.

## **Образовательные результаты, подлежащие проверке в ходе выполнения практических работ -**

в ходе освоения МДК 01. 01. «Технологическое оборудование и коммуникации» и выполнения практических работ у студента формируются *практический опыт и компетенции*:

ПК.1.1. Контролировать эффективность работы оборудования.

ОК 2. Организовывать собственную деятельность, выбирать типовые методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество.

ОК 4. Осуществлять поиск и использование информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональных задач, профессионального и личностного развития.

ОК.8 Использовать информационно-коммуникационные технологии в профессиональной деятельности.

**Внимание!** Если в процессе подготовки к практическим работам или при решении задач у Вас возникают вопросы, разрешить которые самостоятельно не удается, необходимо обратиться к преподавателю для получения разъяснений или указаний в дни проведения дополнительных занятий.

Время проведения дополнительных занятий можно узнать у преподавателя или посмотреть на двери его кабинета.

**Желаем Вам успехов!!!**

## **1 Правила поведения и техника безопасности при проведении лабораторных работ**

К проведению демонстрационных и лабораторных опытов по МДК 01.01. «Технологическое оборудование и коммуникации» допускаются педагогические работники, прошедшие инструктаж по охране труда, медицинский осмотр и не имеющие противопоказаний по состоянию здоровья.

Лица, допущенные к проведению демонстрационных и лабораторных опытов, должны соблюдать правила внутреннего распорядка, расписание учебных занятий, установленные режимы труда и отдыха.

При проведении лабораторных работ МДК 01.01. «Технологическое оборудование и коммуникации» необходимо соблюдать правила пожарной безопасности, знать места расположения первичных средств пожаротушения.

О каждом несчастном случае пострадавший или очевидец несчастного случая обязан немедленно сообщить администрации учреждения. При неисправности оборудования, приспособления или инструмента прекратить работу и сообщить администрации учреждения.

Лица, допустившие невыполнение или нарушение инструкции по охране труда, привлекаются к дисциплинарной ответственности в соответствии с правилами внутреннего трудового распорядка и, при необходимости, внеочередной проверке знаний норм и правил охраны труда.

### **Требования охраны труда перед началом работы**

Тщательно проветрить помещение лаборатории.

В каждой лабораторной работе использовать сборник методических указаний в соответствии с изучаемым МДК и в соответствии с методическими указаниями к работе.

### **Требования охраны труда во время работы**

При работе с приборами из стекла применять стеклянные трубы с оплавленными краями, правильно подбирать диаметры резиновых и стеклянных трубок при их соединении, а концы смачивать водой, глицерином или смазывать вазелином.

Отверстие пробирки или горлышко колбы при нагревании в них жидкостей направлять от себя и студентов, не допускать резких изменений температуры и механических ударов.

Запрещается брать приборы с горячей жидкостью незащищенными руками, а также закрывать сосуд с горячей жидкостью притертой пробкой до его остывания. Во время выполнения работ на установке, во избежание поломки стекол пьезометров и другой стеклянной гарнитуры не допускать резких движений, не выворачивать и не трогать штуцеры на трубопроводах, не производить замену стеклянных пьезометров. Следить за наполнением напорных емкостей не допуская их переливания. Операции по открыванию и закрыванию вентилей производить плавно, без рывков. Включение и отключение гидравлических систем производить только сухими руками.

Не оставлять без присмотра включенные в сеть электрические устройства и приборы.

### **Требования охраны труда в аварийных ситуациях.**

При проведении демонстрационных и лабораторных опытов по гидравлике возможно воздействие на работающих и студентов следующих опасных и вредных производственных факторов:

- термические ожоги при нагревании жидкостей и различных физических тел порезы рук при небрежном обращении с лабораторной посудой и приборами из стекла;

- возникновение пожара при неаккуратном обращении с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями.

Лаборатория должна быть укомплектована медицинской аптечкой с набором необходимых медикаментов и перевязочных средств.

При проведении демонстрационных и лабораторных опытов по необходимо соблюдать правила пожарной безопасности, знать места расположения первичных средств пожаротушения.

О каждом несчастном случае пострадавший или очевидец несчастного случая обязан немедленно сообщить администрации учреждения. При неисправности оборудования, приспособлении и инструмента прекратить работу и сообщить администрации учреждения.

При обнаружении неисправности в работе электрических устройств, немедленно прекратить работу и отключить источник электропитания. Работу продолжать только после устранения неисправности. При коротком замыкании в электрических устройствах и их загорании, немедленно отключить их от сети, эвакуировать студентов из кабинета, сообщить о пожаре в ближайшую пожарную часть и приступить к тушению очага возгорания с помощью углекислотного огнетушителя или песком. При разливе легковоспламеняющейся жидкости и ее загорании, удалить студентов из кабинета, сообщить о пожаре в ближайшую пожарную часть и приступить к тушению очага возгорания с помощью первичных средств пожаротушения. В случае если разбилась лабораторная посуда или приборы из стекла, не собирать их осколки незащищенными руками, а использовать для этой цели щетку и совок. При получении травмы оказать первую помощь пострадавшему, сообщить об этом администрации учреждения, при необходимости отправить пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение.

## **Требования охраны труда по окончании работы**

После окончания выполнения лабораторной работы необходимо отключить электрические устройства и приборы от источника электропитания, проветрить помещение аудитории.

## **2 Первая помощь при несчастных случаях**

### **Первая помощь при ушибах и ранениях глаз**

В первую очередь необходимо остановить кровотечение (жгут, пережатие сосуда, давящая повязка). Если рана загрязнена, грязь удаляется только вокруг, но ни в коем случае не из глубинных слоев раны. Кожу вокруг раны обеззараживают йодной настойкой или раствором бриллиантовой зелени и обращаются в медпункт.

Если после наложения жгута кровотечение продолжается, на рану накладывают стерильный тампон, смоченный 3% – ным раствором пероксида водорода, затем стерильную салфетку и туго бинтуют. Если повязка намокает от пропустившей крови, новую накладывают поверх старой.

Первая помощь при ушибах – покой. На область ушиба накладывают давящую повязку и холод (например, лед в полиэтиленовом мешочке). Ушибленному органу придают возвышенное положение.

При небольшом ранении стеклом убрать осколки раны, продезинфицировать спиртом или йодом, забинтовать.

При ушибах головы пострадавшему обеспечивают полный покой и вызывают «скорую помощь».

Инородные тела, попавшие в глаз, разрешается удалить влажным тампоном. Затем промывают глаз водой из фонтанчика не менее 7-10 мин. Для подачи воды можно также пользоваться чайником или лабораторной промывалкой.

При попадании в глаза едких жидкостей его промывают водой, как указано выше, затем раствором уксусной кислоты или гидрокарбоната натрия, в зависимости от характера попавшего вещества.

После заключительного ополаскивания глаза чистой водой под веки необходимо ввести 2 – 3 капли 30% – ного раствора альбуцида и направить пострадавшего в медпункт.

**Ожоги:** при любом ожоге запрещается пользоваться жирами для обработки обожженного участка. Запрещается также применять красящие вещества (растворы перманганата калия, бриллиантовой зелени, йодной настойки).

При термическом ожоге легкой степени охладить любым способом для уменьшения отека и снятия боли;

Ожог первой степени обрабатывают этиловым спиртом и накладывают сухую стерильную повязку.

При термическом ожоге тяжелой степени накрыть сухой стерильной тканью, для обезболивания применить сухой холод, дать обезболивающее и отправить в больницу;

Затем при ожоге кислотой обмыть 2%-ным раствором питьевой соды, при ожоге щелочью обмыть 1%-ным раствором уксусной кислоты, в обеих случаях наложить повязку, смоченную этиловым спиртом.

При ожогах негашеной известью запрещается пользоваться водой для удаления вещества: снимать известь с кожи следует пинцетом или тампоном, смоченным минеральным или растительным маслом. После удаления с кожи вещества пораженный участок обмывают 2%-ным раствором уксусной кислоты или гидрокарбоната натрия такой же концентрации, затем ополаскивают водой и накладывают повязку с риванолем или фурацилином.

Йод и жидкий бром удаляют с кожи этиловым спиртом и накладывают примочку из 5%-ного раствора гидрокарбоната натрия. В случае ожога бромом немедленно обратиться в медпункт.

**Во всех случаях оказания первой медицинской помощи следует обратиться в медицинское учреждение.**

### **3 Порядок выполнения лабораторных работ.**

1 Студент должен прийти на лабораторное занятие подготовленным по данной теме.

2 Студент должен знать правила по технике безопасности при работе в аудитории.

3 После проведения работы студент представляет письменный отчет.

4 Отчет о проделанной работе следует выполнять в общей тетради для лабораторных работ в клетку. Содержание отчета указано в описании лабораторной работы.

5 Студент должен перед выполнением работы ознакомится с описанием и порядком выполнения работы.

6 Выполнить описание опыта и необходимые к нему расчеты в тетради для лабораторных работ.

7 Привести в порядок рабочее место, сдать его дежурному.

8 Сдать тетрадь с выполненными в полном объеме отчетами и расчетами преподавателю для проверки.

По результатам защиты лабораторных работ студент допускается к экзамену.

#### **4 Защита лабораторной работы.**

1 Представление преподавателю лабораторной тетради с полностью оформленной работой и проверка ее преподавателем.

2 Собеседование с преподавателем по теории, а также ответы на контрольные вопросы в конце каждой лабораторной работы. Если среди контрольных заданий есть уравнения и задачи, то они должны быть выполнены в письменной форме в тетради.

3 Сдать работу преподавателю (т.е. защитить ее на оценку) можно на том же занятии, на котором она выполнялась. Если оформление работы требует дополнительного времени, то защита выполненной лабораторной работы проводится на консультации.

4 При подготовке лабораторной работы к защите следует повторить соответствующие разделы по конспекту лекций и учебнику.

По результатам защиты лабораторной работы выставляется оценка.

### **Требования к оформлению отчетов по лабораторным работам**

#### **Требования к порядку выполнения лабораторных работ:**

1. Прежде чем приступить к работе обучающийся должен ознакомиться с методикой проведения расчетов.
2. Необходимо аккуратно письменно оформить выполненное задание по форме приведенной ниже в тетради для лабораторных работ.
3. Расчет необходимо вести с применением графиков, таблиц, справочных данных или ссылок на справочную литературу.
4. Работа засчитывается после устного ответа на контрольные вопросы и в случае неубедительности ответов студента, ещё и на вопросы по лекции соответствующей данной теме.
5. Контрольные вопросы даны в конце каждой лабораторной работы.

## **СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА СТУДЕНТА**

## **ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткое описание установки.
4. Замеры опытных величин.
5. Расчетная часть (на отдельном листе).
6. Таблицы – результаты опыта и расчета.
7. Графики.
8. Вывод.

## 5. Критерии оценки лабораторной работы.

Таблицы 1 – Критерии оценки для лабораторных работ

Оценка	Критерии
«Отлично»	<ol style="list-style-type: none"><li>Правильно выполнена работа в полном объеме с соблюдением необходимой последовательности и требований к проведению опытов.</li><li>Все опыты проведены в условиях и режимах, обеспечивающих получение результатов и выводов с наибольшей точностью.</li><li>Научно грамотно, логично описаны наблюдения и сформированы выводы из опыта. В представленном отчете правильно и аккуратно выполнены все записи, таблицы, рисунки, графики, чертежи, вычисления и сделаны выводы.</li><li>Проявляются организационно-трудовые умения. Эксперимент осуществляется по плану с учетом техники безопасности и правил работы с материалами и оборудованием.</li></ol>
«Хорошо»	<ol style="list-style-type: none"><li>Опыт проводился в условиях, не обеспечивающих достаточной точности измерений.</li><li>Было допущено два-три недочета или более одной грубой ошибки и одного недочета.</li><li>Эксперимент проведен не полностью или в описании наблюдений из опыта допущены неточности, выводы сделаны неполные.</li></ol>
«Удовлетворительно»	<ol style="list-style-type: none"><li>Работа выполняется правильно не менее, чем на половину, однако объем выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы по основным, принципиально важным задачам работы.</li><li>Работа по началу опыта проведена с помощью преподавателя; или в ходе проведения опыта и измерений допущены ошибки в описании наблюдений, формулировании выводов.</li><li>Допускает грубую ошибку в ходе эксперимента (в объяснении, в оформлении работы, в соблюдении правил техники безопасности при работе с материалами и оборудованием), которая исправляется по требованию преподавателя.</li></ol>

*Продолжение таблицы 1*

Оценка	Критерии
«Неудовлетворительно»	<p>1. Выполнил работу не полностью и объем выполненной работы не позволяет сделать правильных выводов.</p> <p>2. Опыты, измерения, вычисления, наблюдения производились неправильно.</p> <p>3. В ходе работы и в отчете обнаружились в совокупности все недостатки, отмеченные в требованиях к оценке «3»</p> <p>4. Допускает две и более грубые ошибки в ходе эксперимента, в объяснении, в оформлении, работы, в соблюдении правил техники безопасности при работе с веществами и оборудованием, которые не может исправить даже по требованию преподавателя.</p>

Таблица 2 – Критерии оценки ответа на устные вопросы при защите лабораторной работы

Оценка	Критерии
«Отлично»	Выставляется студенту, глубоко и прочно усвоившему программный материал, исчерпывающе, грамотно и логически стройно его излагающему, в свете которого тесно увязывается теория с практикой. При этом студент не затрудняется с ответом при видоизменении задания, свободно справляется с вопросами.
«Хорошо»	Выставляется студенту, твердо знающему программный материал, грамотно и по существу излагающего его, который не допускает существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения.

*Продолжение таблицы 2*

Оценка	Критерии
«Удовлетворительно»	Выставляется студенту, который имеет знания только основного материала, но не усвоил его детали, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения последовательности в изложении программного материала.
«Неудовлетворительно»	Выставляется студенту, который не усвоил значительной части программного материала, допускает существенные ошибки.

## 6. Лабораторная работа № 1

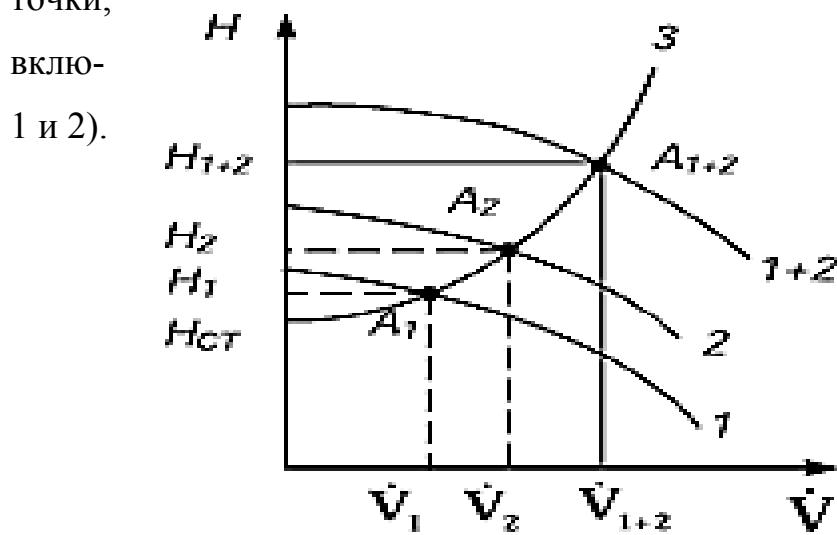
**Тема:** Последовательная и параллельная работа центробежных насосов на сеть.

**Цель:** 1) ознакомление со схемой последовательного и параллельного соединений двух одинаковых центробежных насосов на сеть; 2) экспериментальное определение напорной характеристики одного насоса и суммарных кривых напора при последовательной и параллельной работе двух насосов; сравнение их с теоретическими кривыми, построенными на основе зависимости  $H = f(V)$  для одного насоса; 3) построение характеристики сети и определение рабочих точек при последовательном и параллельном соединении насосов.

**Приборы и оборудование:** установка для снятия напорных характеристик насосов.

Последовательное соединение насосов обычно применяется для увеличения напора в тех случаях, когда один насос не может создать требуемого напора. При этом подача насосов изменяется незначительно, а общий напор теоретически равен сумме напоров обоих насосов, взятых при одной и той же подаче. Следовательно, теоретическая суммарная характеристика насосов 1+2 (рисунок 1) получается сложением ординат напорных характеристик 1 и 2 обоих насосов (в случае одинаковых насосов ординаты надо удваивать). Пересечение теоретической суммарной характеристики насосов с характеристикой сети 3 даёт рабочую точку  $A_{1+2}$ , которая определяет подачу  $V_{1+2}$ , суммарный напор  $H_{1+2}$  обоих насосов. Видно, что при последовательном соединении насосов  $H_{1+2} < (H_1 + H_2)$ , а  $\dot{V}_{1+2} > \dot{V}_1, \dot{V}_2$  (на рисунке 1  $A_1$  и  $A_2$  - рабочие

точки, включенные в сеть при отсутствии насосов 1 и 2).



которые получаются при включении отдельных насосов

Рисунок 1 — Последовательная работа двух центробежных насосов на сеть

Параллельное соединение насосов обычно применяют для увеличения подачи. При параллельном соединении насосов (рисунок 2) напор их изменится мало. Для получения теоретической суммарной характеристики двух насосов следует сложить абсциссы точек кривых  $H = f(\dot{V})$  обоих насосов, взятых при той же ординате. Иными словами, нужно сложить кривые напоров по горизонтали (в случае одинаковых насосов абсциссы надо удваивать).

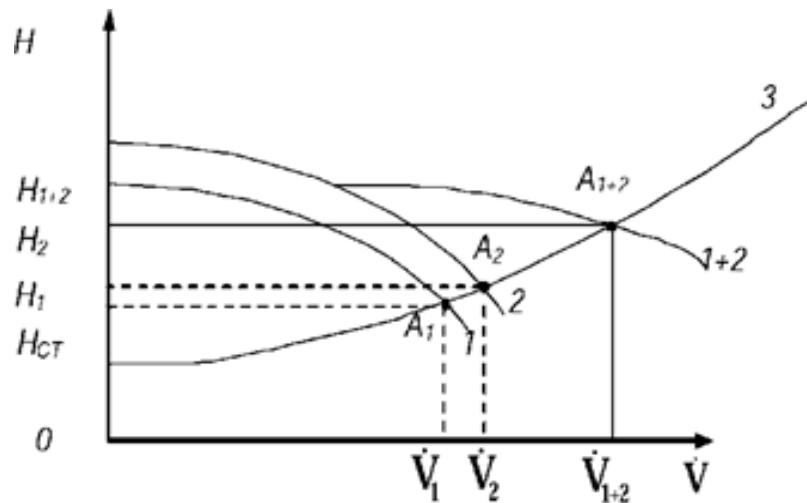


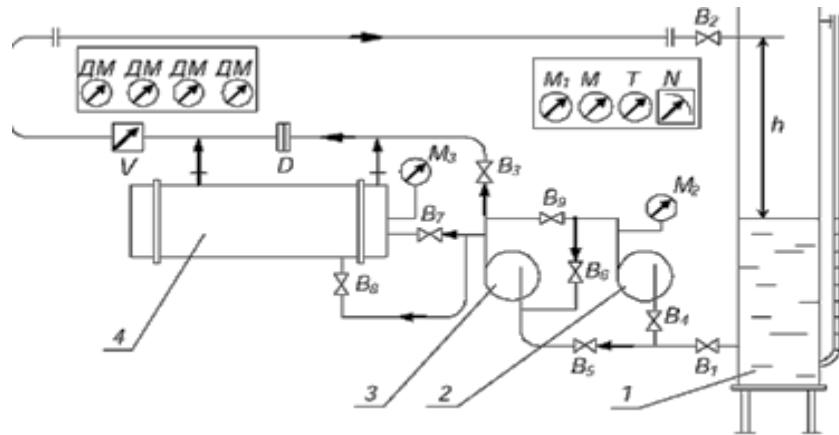
Рисунок 2 — Параллельная работа двух центробежных насосов на сеть

Пересечение суммарной характеристики 1+2 с характеристикой сети 3 дает рабочую точку  $A_{1+2}$ . Абсцисса точки  $A_{1+2}$  равна суммарной подаче обоих насосов  $\dot{V}_{1+2}$ , ордината – напору  $H_{1+2}$ . Видно, что при параллельном соедине-

нии насосов  $\dot{V}_{1+2} < (\dot{V}_1 + \dot{V}_2)$ , а (на рисунке 2  $A_1$  и  $A_2$  – рабочие точки, которые получаются при включении отдельных насосов 1 и 2).

### Описание установки.

Установка для снятия напорных характеристик насосов приведена на рисунке 3.



1 – бак, 2,3 – насосы, 4 – кожухотрубчатый теплообменник

Рисунок 3 – Установка для снятия напорных характеристик насосов

Установка состоит из питательного бака 1, одинаковых центробежных насосов 2 и 3 марки К 20/30, трубопроводов, необходимых запорных устройств. Свободная поверхность воды в баке 1 выше уровня насоса, поэтому насосы не требуют предварительной заливки. На нагнетательном трубопроводе установлен вентиль  $B_3$  для регулирования производительности насосов и счетчик для измерения подачи. Гидравлическая система замкнута, т.е. насосы всасывают воду из бака 1 и подают ее в тот же бак. На пульте управления смонтированы манометр  $M_1$  и мановакуумметр  $M_2$ .

### Порядок проведения работы.

Сначала проводят испытания одного насоса. Открывают вентили  $B_1$ ,  $B_4$ ,  $B_9$ ,  $B_2$  и закрывают вентили  $B_3$ ,  $B_5$ ,  $B_6$ ,  $B_7$ ,  $B_8$ . Проверив наличие воды в питательном баке, включают насос 2. Первое наблюдение проводится при полностью закрытом вентиле  $B_3$  на нагнетательной линии. Во избежание нагрева воды работы насосов при закрытом вентиле  $B_3$  не должна продолжаться более 5 минут. Следующее наблюдение осуществляется при постепенном открытии вентиля  $B_3$  для каждого нового режима работы (не менее 5 опытов). Последнее наблюдение проводят при полностью открытом вентиле. Для каждого режима измеряют следующие величины: 1) объём воды  $V$  (показания водомера  $V$ ), прошедшей за время  $t$  (примерно 60-120 с);  
2) избыточное давление в нагнетательной линии после насосов  $p_m$  и избыточное давление во всасывающей линии  $p_b$  (показания манометра  $M_1$  и мановакуумметра  $MB$ ).

При последовательном соединении вентили  $B_1$ ,  $B_4$ ,  $B_6$  и  $B_2$  необходимо открыть, а остальные вентили  $B_3$ ,  $B_5$ ,  $B_7$ ,  $B_9$  и  $B_8$  закрыть. Методика проведения испытаний такая же, как и для одного насоса. При параллельном соединении насосов вентили  $B_1$ ,  $B_4$ ,  $B_5$ ,  $B_9$  и  $B_2$  необходимо открыть, а остальные  $B_3$ ,  $B_6$ ,  $B_7$ ,  $B_8$  закрыть.

### Обработка результатов опыта.

Подача рассчитывается по формуле:

$$\dot{V} = \frac{V}{t}. \quad (1)$$

Напор, развиваемый насосами, находится следующим образом:

$$H = \frac{p_m - p_b}{\rho g} + Z + Z_m, \quad (2)$$

где  $p_m$  – избыточное давление в нагнетательной линии;

$p_b$  – избыточное давление во всасывающей линии;

$\rho$  – плотность жидкости (воды);

$Z$  – расстояние по вертикали между точками присоединения мановакуумметра и манометра  $M_1$ ;

$Z_M$  – расстояние по вертикали от точки присоединения манометра до его оси ( $Z + Z_M = 0,8\text{м}$ ).

Характеристика сети (зависимость между потребным напором и расходом) определяется уравнением:

$$H_c = H_{ct} + \sum \Delta h_i = H_{ct} + \left( \lambda_r \frac{\ell}{d} + \sum \zeta_i \right) \frac{\bar{w}^2}{2g}, \quad (3)$$

где  $H_{ct}$  – статический напор;

$\ell = 12\text{м}$  и  $d = 0,05\text{м.}$ , - общая длина и внутренний диаметр трубопровода;  
 $\lambda_A = 0,03$  – коэффициент гидравлического трения;

$\sum \zeta_i$  – суммарный коэффициент местного сопротивления сети при полностью открытом вентиле  $B_3$ ;

$\bar{w}$  – средняя скорость движения воды в трубопроводе.

В нашем случае  $H_{ct} = h$  – расстояние по высоте между свободной поверхностью воды в питательном баке и осью трубы для обратной подачи воды в бак.

Имея в виду, что  $\bar{V} = \frac{\pi d^2}{4} \bar{w}$ , уравнение (3) можно представить в

виде :

$$H_c = h + \left( \lambda_r \frac{\ell}{d} + \sum \zeta_i \right) \frac{8\dot{V}^2}{\pi^2 d^4 g}, \quad (4)$$

Уравнение (4) используется для построения характеристики

сети.

Величины, измеренные в процессе проведения испытаний одного насоса и двух насосов при их параллельном и последовательном соединении, а также полученные расчетом, заносятся в таблицу 1.

Таблица 1 — Результаты

№ опытов	Изменение величины				Вычисленные величины		
	$P_m$ , кгс/см <sup>2</sup>	$P_v$ , кгс/см <sup>2</sup>	$V$ , л	$t, c$	$\dot{V}$ , л/с	$H$ , м	$H_c$ , м

По результатам испытаний одного насоса строится его напорная характеристика, используя которую, нужно построить теоретические суммарные характеристики двух насосов при их параллельном и последовательном соединении. Далее строятся экспериментальные суммарные напорные характеристики для последовательного и параллельного соединения с использованием данных таблицы. Характеристика сети строится по уравнению (4), после чего определяются теоретические и экспериментальные рабочие точки.

### Контрольные вопросы:

1. Для чего применяется последовательное соединение насосов?
2. В каких случаях используется параллельное соединение насосов?
3. Как строится суммарная характеристика двух насосов при последовательном их соединении?
4. Как строится суммарная характеристика двух насосов при параллельном их соединении?
5. От чего зависит характеристика сети?
6. Как определяется рабочая точка?

### Лабораторная работа № 2

**Тема:** Определение режима течения воды в цилиндрической трубе круглого сечения.

**Цель:** 1) визуальное наблюдение течения жидкости в цилиндрической трубе круглого сечения; 2) определение значения числа Рейнольдса, соответствующего наблюдаемым режимам течения.

**Приборы и оборудование:** гидравлический стенд ТМЖ-2, модуль №6, секундомер, термометр, подкрашивающая жидкость, мерный стеклянный стакан.

Режим течения жидкости определяется геометрией канала, скоростью течения и вязкостью жидкости. Так, при течении в трубах и каналах постоянного сечения с малой скоростью жидкость движется отдельными струйками, не смешиваясь, параллельно стенкам трубы или канала. Если ввести в поток подкрашенную струйку жидкости, то она будет двигаться, не размываясь, параллельно стенкам трубы. При этом траектории отдельных частиц жидкости между собой не пересекаются, они совпадают с линиями тока. Такой режим называется ламинарным, или струйчатым. При этом режиме все частицы жидкости имеют лишь продольную составляющую скорости.

По мере увеличения скорости движения потока окрашенная струйка жидкости, введенная в поток, начинает размываться, искривляться и пульсировать, что объясняется появлением у частиц жидкости поперечных составляющих скорости. При дальнейшем увеличении скорости потока струйка распадается на ряд вихрей, вся жидкость перемешивается и равномерно окрашивается в цвет подкрашенной струйки. Траектории частиц представляют собой сложные хаотичные кривые, пересекающиеся между собой. Во всех точках потока скорость и давление нерегулярно изменяются с течением времени, пульсируют вокруг некоторых своих средних значений. Такое же нерегулярное изменение скорости имеет место и от точки к точке потока, рассматриваемого в заданный момент времени. Этот режим движения жидкости называется турбулентным.

Точно так же будет меняться режим течения жидкости, если при малой ее скорости увеличивать диаметр канала, или при постоянных и относительно небольших диаметре и скорости понижать вязкость жидкости.

В турбулентном потоке можно говорить не о мгновенных, а только об осредненных за достаточно протяженный отрезок времени величинах скорости и давления.

Между ламинарным и турбулентным режимами движения жидкости находится область развития турбулентности. В этой области турбулентность имеет переменную интенсивность, увеличивающуюся с ростом скорости.

При выполнении расчетов гидравлических сопротивлений, тепловых и массообменных процессов, происходящих в аппаратах и машинах, необходимо знать режимы течения жидкостей, поскольку для ламинарного режима характерны одни закономерности, а для турбулентного – другие.

Визуальное определение режима течения не всегда возможно. Поэтому на практике о режиме течения судят по количественной характеристике, т. Е. по значению критерия (числа) Рейнольдса  $Re$ :

$$Re = \frac{\bar{w}\ell\rho}{\mu} = \bar{w}\ell/\nu, \quad (1)$$

где  $\bar{w}$  – средняя скорость потока, м/с;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu, \mu$  – кинематический (м<sup>2</sup>/с) и динамический (Па·с) коэффициенты вязкости жидкости соответственно;

$\ell$  – некоторый характерный размер потока, м, например,  $\ell = d_3$  – эквивалентный диаметр, который определяется из выражения:

$$d_3 = 4 \frac{S}{\Pi}, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения потока (живого сечения), м<sup>2</sup>;

$\Pi$  – смоченный периметр, м.

Для круглой трубы  $d_3 = d$ , где  $d$  – внутренний диаметр трубы.

С физической точки зрения критерий  $Re$  есть мера отношения сил инерции к силам вязкого трения в потоке.

Установлено, что в круглых трубах при числе  $Re < 2320$  имеет место ламинарный режим течения, а при  $Re > 10000$  – развитый турбулентный. В переходной области, охватывающей числа  $Re$  от 2320 до 10000, происходит развитие турбулентности. Значение  $Re = 2320$  называется критическим значением числа Рейнольдса. Это критическое число не является, конечно, универсальным, для каждой формы канала существует свое критическое число.

Конструкция и описание принципиальной схемы гидравлического универсального стенда типа **ТМЖ2** представлены в приложении 1.

### **Порядок проведения работы.**

- убедиться в готовности стенда к проведению лабораторной работы в соответствии с правилами;
- установить исследуемый модуль №6 в кронштейны, подсоединив левый конец модуля к рукаву напорного бака, правый к игольчатому вентилю 8;
- подключить емкость с окрашенной жидкостью при помощи гибкой трубы к штуцеру модуля;
- перекрыть поток жидкости в стеклянной трубке модуля посредством закрытия вентиля 8.

#### **1. Работа с ротаметром Р3 (при небольшой скорости движения жидкости):**

- 1.1 Включить электронасос;
- 1.2 Установить расход жидкости по шкале ротаметра Р3 на отметке 3;
- 1.3 Приоткрыть поток жидкости в установленном модуле игольчатым вентилем 8;
- 1.4 Отметить наблюдаемый результат.

**2. Работа с ротаметром Р3 (при большой скорости движения жидкости):**

- 2.1 Установить расход жидкости по шкале ротаметра Р3 на отметке 6;
- 2.2 Открыть поток жидкости в установленном модуле игольчатым вентилем 8;
- 2.3 Отметить наблюдаемый результат;

**3. Работа с ротаметром Р3 (переход от большей к меньшей скорости движения жидкости):**

- 3.1 Установить расход жидкости по шкале ротаметра Р3 на отметке 3;
- 3.2 Приоткрыть поток жидкости в установленном модуле игольчатым вентилем 8;
- 3.3 Отметить наблюдаемый результат;
- 3.4. Выключить электронасос.

**После окончания работы со стендом обработать результаты опыта в соответствии с таблицей 2.**

**Обработка результатов опыта.**

Вычисляются критерии режима движения жидкости для каждого опыта, исходя из выражения:

$$Re = \frac{\bar{w}d}{\nu}, \quad (3)$$

где  $d$  – внутренний диаметр стеклянной трубы, м.

Средняя скорость  $\bar{w}$  определяется из уравнения расхода:

$$\bar{w} = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{4\dot{V}}{\pi d^2}. \quad (4)$$

$$\dot{V} = \frac{V}{t},$$

где  $\dot{V}$  – расход воды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$V$  – объем воды в баке (стакане),  $\text{м}^3$ ;

$t$  – время наполнения этого объема, с.

Значение кинематического коэффициента вязкости воды в зависимости от температуры даны в таблице 1.

Таблица 1 - Значение кинематической вязкости воды  $\nu$   $\text{м}^2/\text{с}$  в зависимости от  $t^\circ\text{C}$

$t^\circ\text{C}$	$\text{м}^2/\text{с}$
0	$0,00000178 \approx 1,8 \cdot 10^{-6}$
5	$0,00000152 \approx 1,5 \cdot 10^{-6}$
10	$0,00000131 \approx 1,3 \cdot 10^{-6}$
12	$0,00000124 \approx 1,2 \cdot 10^{-6}$
15	$0,00000114 \approx 1,1 \cdot 10^{-6}$
20	$0,00000101 \approx 1,0 \cdot 10^{-6}$

Результаты опытов и расчетов сводятся в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты измерений

№п/п	Наблюдаемый режим движения	Характеристика режима движения (описать, зарисовать схематично)	Обработка полученных данных
1			$Q_1 =$  $W_1 =$  $Re_1 =$

*Продолжение таблицы 2*

№п/п	Наблюдаемый режим движения	Характеристика режима движения (описать, зарисовать схематично)	Обработка полученных данных
2			$Q_2 =$  $W_2 =$  $Re_2 =$
3			$Q_3 =$  $W_3 =$  $Re_3 =$

$$T = {}^\circ C, v = \text{м}^2/\text{с}.$$

**Контрольные вопросы:**

1. Какие существуют режимы течения жидкости? Опишите их.
2. В чем заключается физический смысл критерия Рейнольдса?
3. Как определяется режим течения?
4. От каких параметров потока зависит режим течения?
5. Назовите критическое значение критерия  $Re$  для трубы круглого сечения.
6. Зачем нужно знать режим течения?
7. Как изменяется режим течения в данной работе?
8. Каким образом изменяется скорость потока?
9. Как поддерживается установившийся характер потока?

## Лабораторная работа № 3

**Тема:** Определение потерь напора в прямой трубе круглого сечения.

**Цель:** 1) определение потерь напора  $\Delta h_1^0$  непосредственно из опыта при различных скоростях движения воды; 2) определение потерь напора по длине  $\Delta h_1$  расчетным путем; 3) сравнение полученных опытных значений с вычисленными.

**Приборы и оборудование:** универсальный стенд типа **ТМЖ2**, водомер; секундомер, ртутный термометр.

**Гидравлические сопротивления и потери напора при движении жидкости. Общие понятия и определения. Основные расчетные формулы.**

При движении жидкости по трубопроводам действуют гидравлические сопротивления, приводящие к потерям напора.

Общие потери напора определяют по формуле, м

$$h_f = h_\ell + h_m \quad (1)$$

где  $h_\ell$  - потери напора по длине трубопровода, возникающие вследствие вязкости жидкости и взаимодействия ее с ограждающими стенками канала (трубопровода) при равномерном движении, пропорциональные длине трубопровода, и обратнопропорциональные диаметру, м;

$h_m$  – потери напора на преодоление местных сопротивлений, происходящие из-за резкого изменения скорости (внезапные повороты, расширения или сужения трубопровода, прохождение потока через измерительные диафрагмы, различную арматуру и пр.).

## **Определение потерь напоров на трение.**

Потери напора по длине определяются по формуле Дарси-Вейсбаха, м

$$h_\ell = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{\omega}{2}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – безразмерный гидравлический коэффициент трения, который зависит от состояния поверхности внутренних стенок трубопровода, вязкости жидкости, скорости движения. Определение  $\lambda$  является одной из наиложнейших проблем механики жидкости;

$\ell$  - длина трубопровода, м;

$d$  – диаметр трубопровода, м.

### **Определение $\lambda$ при ламинарном режиме движения жидкости.**

При ламинарном режиме движения  $\lambda$  зависит только от числа  $Re$ , т.к. пропорционален скорости и определяется по формуле

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (3)$$

### **Определение $\lambda$ при турбулентном режиме движения жидкости**

Определение  $\lambda$  для турбулентного режима производят по эмпирическим формулам в зависимости от степени гладкости труб и вида трения. В зависимости от скорости движения жидкости, одна и та же труба может быть гидравлически гладкой или гидравлически шероховатой, поэтому вводят понятие – **эквивалентная шероховатость,  $K_\varepsilon$ , мм;**

$K_\varepsilon/d$  – относительная шероховатость;

$d/K_\varepsilon$  – относительная гладкость.

В данной работе значение  $K_\varepsilon$  следует принимать 0,01 мм.

Зная значения  $K_\varepsilon$  и  $Re$ , гидравлический коэффициент трения  $\lambda$  можно определить из номограммы или по формуле, но для этого прежде всего необходимо определить, в какой зоне трения происходит течение жидкости.

### **1. Зона гладкого трения (область гидравлически гладких труб)**

В этой области шероховатость не оказывает влияние на характер течения жидкости и  $\lambda$  зависит только от режима движения, а следовательно, только от числа  $Re$ . При  $Re$  до 10 000 значение  $\lambda$  определяют по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (4)$$

### **2. Зона шероховатого трения (область квадратичного сопротивления шероховатых русел)**

В этой области потери напора по длине пропорциональны квадрату средней скорости, зависят от относительной шероховатости и не зависят от числа  $Re$ .

При  $Re > 92 000$  значение  $\lambda$  определяют по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{K_\varepsilon}{d} \right)^{0,25}. \quad (5)$$

### **3. Зона смешанного трения (переходная область)**

Потеря напора зависит от числа  $Re$  и относительной шероховатости. При  $Re$  от 10 000 до 92 000 значение  $\lambda$  определяют по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{K_3}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (6)$$

### Определение потерь напора на местные сопротивления.

Потери напора на местные сопротивления определяют по формуле Вейсбаха:

$$h_m = \zeta \frac{\omega^2}{2}, \quad (7)$$

где  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления;

$\omega$  – наибольшая линейная скорость, м/с.

Коэффициент местного сопротивления  $\zeta$  для некоторых видов сопротивлений может быть определен по формулам или справочникам.

Общий потерянный напор определяется по формуле

$$h_f = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2} + \sum \zeta \cdot \frac{\omega^2}{2} \left( \lambda \frac{\ell}{d} + \sum \zeta \right). \quad (8)$$

Таблица 1 – Определение  $\zeta$  в случае установки диафрагмы

$S_d / S_{tr}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Z	226	47,8	17,5	7,8	3,75	1,8	0,8	0,29	0,061	0,001

Для случая установки диафрагмы, значение  $\zeta$  может быть также определено по формуле Идельчика:

$$\zeta = \left(1 + \frac{0,707}{\sqrt{1 - \frac{S}{S_{mp}}}}\right)^2 \left(\frac{S}{S_{mp}} - 1\right)^2 \quad (9)$$

**Описание установки.** Конструкция и описание принципиальной схемы гидравлического универсального стенда типа **ТМЖ2** представлены в приложении 1.

### **Порядок проведения работы.**

- убедиться в готовности стенда к проведению лабораторной работы;
- установить исследуемый модуль **№1** в кронштейны, подсоединив левый конец модуля к рукаву напорного бака, правый к игольчатому вентилю **8**.
- подключить штуцеры модуля гибкими трубками к штуцерам переходной колодки пьезометра **2** и **3**;
- установить одинаковый уровень в пьезометрических трубках («нулевое положение»), для чего вращая вентиль **8** временно освободить трубы **КД** и **КП** от зажимов и вновь их пережать.

#### **Работа с ротаметром Р1**

- включить электронасос;
- регулируя степень открытия вентиля **1** установить по шкале ротаметра **Р1** расход жидкости, протекающей через модуль на отметке **98**.
- снять показания по шкале пьезометров **2** и **3**;
- по мере уменьшения расходов переходят на работу с ротаметром **Р2**, поэтому вентиль **1** необходимо закрыть.

#### **Работа с ротаметром Р2**

- открыть вентиль **2**;
- снять показания по шкале пьезометров;
- закрыть вентиль **2** и выключить электронасос.

## **Обработка результатов опыта.**

После окончания работы со стендом обработать результаты опыта в соответствии с методическими указаниями и сделать выводы. Результаты измерений свести в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты измерений

Расход по шкале ротаметров, л/ч	Показания пьезометров, см.вод.ст			
	Ротаметр $P_1$		Ротаметр $P_2$	
	№	№	№	№
$Q_{h1}$				
$Q_{h2}$				

### **Контрольные вопросы:**

1. Что представляет собой потерянный напор?
2. Как определяется потерянный напор в прямой трубе расчетным и опытным путем?
3. От чего зависит коэффициент гидравлического трения  $\lambda$ ?
4. Каков порядок расчета коэффициента  $\lambda$ ?

5. Почему в этой работе потерянный напор определяется как разность пьезометрических напоров на концах трубопровода и не учитываются изменения скоростного и геометрического напоров?
6. Какие области гидравлического сопротивления вы знаете?
7. Каков смысл понятия "гидравлически гладкие трубы"?
8. Как определяется средняя скорость потока в трубе?

## Лабораторная работа № 4

**Тема:** Изучение теплообмена в теплообменнике типа «труба в трубе».

**Цель:** 1) ознакомиться со схемой установки и конструкцией теплообменника типа «труба в трубе»; 2) найти опытные и расчетные значения коэффициента теплопередачи при различных условиях проведения эксперимента; 3) проанализировать влияние различных факторов на коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи.

Теплообмен – перенос энергии в форме тепла. Теплообменными называются процессы, скорость протекания которых определяется скоростью подвода или отвода тепла.

В теплообменных процессах тепло передается от одних сред к другим, имеющих общее название теплоносители. Теплообмен может осуществляться как при непосредственном контакте теплоносителей, так и через разделяющую их стенку. Теплопередача – перенос тепла от одного теплоносителя к другому через границу раздела фаз. Теплоотдача – перенос тепла внутри теплоносителя от границы раздела фаз к ядру фазы или в обратном направлении. В интегральной форме уравнения теплопередачи (1) и теплоотдачи (2) можно записать:

$$\bar{Q} = K \cdot F \cdot (\overline{T_\Gamma} - \overline{T_X}) = K \cdot F \cdot \Delta T_{\text{ср}} , \quad (1)$$

$$\bar{Q} = a_\Gamma \cdot F \cdot (\overline{T_\Gamma} - \overline{T_\Gamma^{\text{тр}}}) = a_X \cdot F \cdot (\overline{T_X^{\text{тр}}} - \overline{T_X}), \quad (2)$$

где  $\bar{Q}$  – тепловая нагрузка (количество тепла, передаваемое через границу раздела фаз за единицу времени);

$F$  – поверхность теплопередачи;

$\Delta T_{\text{ср}} = \overline{T_\Gamma} - \overline{T_X}$  – средняя по поверхности  $F$  разность температур горячего  $T_\Gamma$  и холодного  $T_X$  теплоносителей (движущая сила процесса теплопередачи);  $\overline{T_\Gamma^{\text{тр}}} - \overline{T}$  – средняя по поверхности  $F$  разность температур теплоносителя в непо-

средственной близости от границы раздела фаз  $T_g^{rp}$ ,  $T_x^{rp}$  и в ядре фазы  $T_g$ ,  $T_x$  (движущая сила процесса теплоотдачи);

$K$  - коэффициент теплопередачи (количество тепла, переносимое от одного теплоносителя к другому за единицу времени через единицу поверхности в расчете на единицу движущей силы);

$a_g$ ,  $a_x$  - коэффициенты теплоотдачи горячего и холодного теплоносителей (количество тепла, передаваемое от границы раздела фаз к ядру фазы или в обратном направлении за единицу времени, через единицу поверхности в расчете на единицу движущей силы).

Тепловая нагрузка теплообменника может быть найдена из уравнений теплового баланса, в соответствии с которыми она равна количеству тепла, отдаваемому за единицу времени горячим теплоносителем, а также количеству тепла, воспринимаемому за единицу времени холодным теплоносителем. Допуская отсутствие потерь тепла в окружающую среду, при неизменном фазовом состоянии теплоносителей эти уравнения можно записать в виде:

$$\bar{Q} = \overline{Q_g} = \overline{Q_x}, \quad (3)$$

$$\overline{Q_g} = \bar{V}_g \cdot \rho_g \cdot c_g \cdot (T_{gh} - T_{gk}), \quad (4)$$

$$\overline{Q_x} = \bar{V}_x \cdot \rho_x \cdot c_x \cdot (T_{xh} - T_{xk}), \quad (5)$$

где  $\bar{V}_g$ ,  $\bar{V}_x$  - объемные расходы;

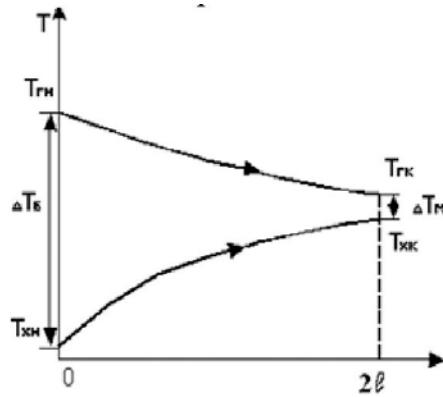
$\rho_g$ ,  $\rho_x$  - плотности;

$C_g$ ,  $C_x$  - удельные теплоемкости;

$T_{gh}$ ,  $T_{xh}$  - начальные температуры;

$T_{gk}$ ,  $T_{xk}$  - конечные температуры горячего и холодного теплоносителей.

Средняя движущая сила теплопередачи при прямоточном движении теплоносителей и допущении, что структура их потоков близка к модели идеального вытеснения, может определяться как средняя логарифмическая величина. Изменение температур теплоносителей по длине аппарата представлено на рисунке 4.



2ℓ - длина труб в обеих секциях теплообменника, изображенного на рисунке 1;

$\Delta T_6$  и  $\Delta T_m$  - разности температур теплоносителей на концах аппарата.

Рисунок 1 —Распределение температур по длине аппарата при прямоточном движении теплоносителей

$$\Delta T_{cp} = \frac{\Delta T_6 - \Delta T_m}{\ln \frac{T_6}{T_m}}, \quad (6) \quad \Delta T_6 = T_{gh} - T_{xh}, \quad (7) \quad \Delta T_m = T_{gk} - T_{xk}, \quad (8)$$

Измерив в опыте расходы теплоносителей, а также их начальные и конечные температуры и зная величину поверхности теплопередачи, из уравнения (1) с использованием (3) – (8) может быть найдено опытное значение коэффициента теплопередачи  $K_{op}$ .

Расчетное значение коэффициента теплопередачи  $K_p$  в случае теплопередачи через плоскую стенку можно найти с использованием коэффициентов теп-

лоотдачи и суммарного термического сопротивления стенки  $\sum r_{ct}$ , которое определяется термическим сопротивлением самой стенки, а также термическими сопротивлениями загрязнений со стороны каждого теплоносителя:

$$K_p = \frac{1}{\frac{1}{a_r} + \sum r_{ct} + \frac{1}{a_x}}, \quad (7)$$

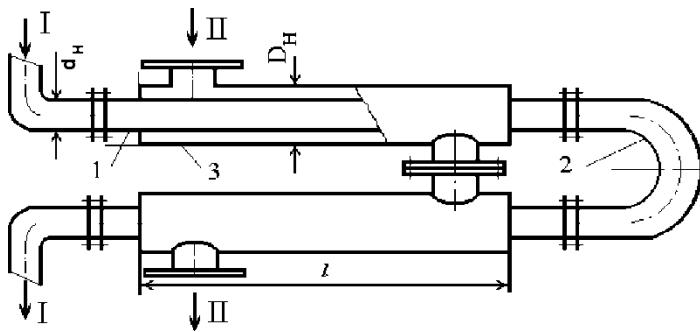
$$\sum r_{ct} = \frac{\delta}{\lambda} + r_{3r} + r_{3x}, \quad (8)$$

где  $\delta, \lambda$  - толщина и коэффициент теплопроводности стенки;

$r_{3r}, r_{3x}$  - термические сопротивления загрязнений со стороны горячего и холодного теплоносителей.

Наибольшую сложность при расчете коэффициентов теплопередачи составляет определение коэффициентов теплоотдачи. Перенос тепла внутри теплоносителя может осуществляться за счет четырех механизмов: молекулярного, конвективного, турбулентного и излучением. Последним в жидких средах можно пренебречь. Коэффициент теплоотдачи зависит от формы и размера канала, по которому движется теплоноситель, теплофизических свойств теплоносителя и характера его движения.

Теплообменники типа «труба в трубе» состоят из последовательно соединенных секций (рисунок 2). Каждая секция представляет собой конструкцию из двух соосных круглых труб разного диаметра. Один из теплоносителей (в нашем случае горячий) движется по внутренней трубе, а другой (холодный) - по кольцевому пространству между трубами. Внутренняя труба с наружным диаметром  $d_h$ , называемая теплообменной 1, соединяется с другой секцией калачом 2. Внешняя труба с наружным диаметром  $D_h$  называется кожуховой 3. Кольцевые пространства секций соединяются с помощью штуцеров.



1 - теплообменная труба; 2 - калач; 3 - кожуховая труба; I, II - входы и выходы теплоносителей.

Рисунок 2 — Теплообменник типа «труба в трубе»

Теплопередача между теплоносителями происходит через стенку внутренней (теплообменной) трубы на участке контакта теплоносителей длиной  $\ell$  для каждой из секций. Судить о характере изотермического движения жидкости в канале можно по величине критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{\bar{w} \cdot d_{\varnothing} \cdot \rho}{\mu}, \quad (9)$$

$$d_{\varnothing} = \frac{4S}{\Pi_c}, \quad (10)$$

где  $\bar{w}$  - средняя по сечению канала скорость жидкости;

$\rho, \mu$  - плотность и динамический коэффициент вязкости жидкости;

$S, d_{\varnothing}, \Pi_c$  - площадь поперечного сечения, эквивалентный диаметр и сомченный периметр канала. При  $Re < 2300$  в каналах круглого и кольцевого сечения наблюдается ламинарный режим течения, при  $2300 < Re < 10^4$  - переходный, при  $Re > 10^4$  - развитый турбулентный. При неизотермическом течении (неоднородности поля температур, наблюдавшейся при теплообмене) характер движения усложняется. Так, например, в горизонтальных круглом и кольцевом каналах возникают циркуляционные конвективные токи, вызванные естественной конвекцией (рисунок 3).

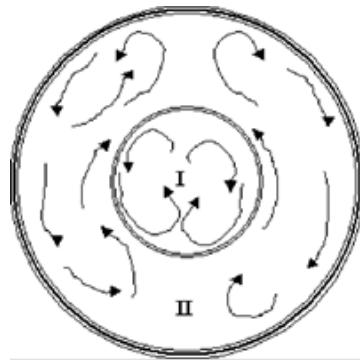


Рисунок 3 –Направления циркуляционных токов в горизонтальном теплообменнике типа «труба в трубе» при  $T_I > T_{II}$

Заметное влияние на теплоотдачу естественная конвекция начинает оказывать при  $(Gr \cdot Pr) > 8 \cdot 10^5$ :

$$Gr = g \cdot d_3^3 \cdot \beta_p \cdot \rho^2 \cdot \frac{\Delta T}{\mu^2}, \quad (11)$$

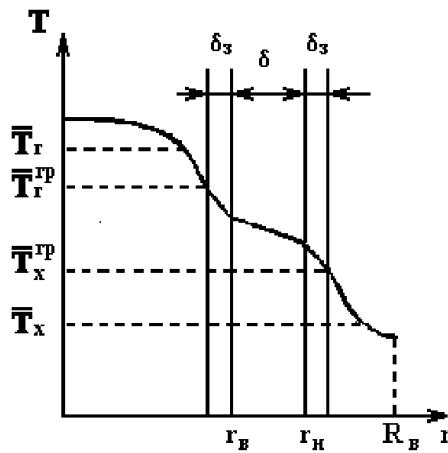
$$Pr = \mu \cdot \frac{c_p}{\lambda}, \quad (12)$$

где  $Gr$  и  $Pr$  - критерии Грасгофа и Прандтля соответствующего теплоносителя,

$g$  - ускорение свободного падения,

$\beta_p$  - коэффициент объемного расширения,

$\Delta T$  - движущая сила теплоотдачи.



$r_b$ ,  $r_h$  - внутренний и наружный радиусы теплообменной трубы;

$R_b$  - внутренний радиус кожуховой трубы.

Рисунок 4 – Изменение температуры в процессе теплопередачи через стенку теплообменной трубы толщиной  $\delta$  при наличии загрязнений толщиной  $\delta_3$

Наименьшие коэффициенты теплоотдачи наблюдаются при ламинарном режиме движения в каналах при отсутствии влияния естественной конвекции, так как перенос тепла в направлении, перпендикулярном поверхности теплопередачи, осуществляется лишь за счет молекулярного механизма. Возникновение конвективных токов (рисунок 6) вызывает дополнительный перенос тепла за счет конвективного механизма и, следовательно, увеличению коэффициентов теплоотдачи. Переход от ламинарного к турбулентному режиму движения приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи за счет дополнительного переноса тепла турбулентным механизмом. В инженерной практике коэффициенты теплоотдачи рассчитывают с использованием критериальных уравнений. Сложность таких расчетов заключается в необходимости знания средних граничных температур  $\bar{T}_x^{rp}$ ,  $\bar{T}_r^{rp}$  теплоносителей (рисунок 4), входящих в критериальное уравнение и учитывающих изменение теплофизических свойств теплоносителя от ядра до границы раздела фаз. Определить их, а также коэффициенты теплоотдачи можно из решения системы пяти уравнений:

$$\bar{Q} = a_r \cdot F \cdot (\bar{T}_r - \bar{T}_r^{rp}), \quad (13)$$

$$\bar{Q} = a_x \cdot F \cdot (\bar{T}_x^{\text{rp}} - \bar{T}_x), \quad (14)$$

$$\bar{Q} = \frac{F(\bar{T}_g^{\text{rp}} - \bar{T}_x^{\text{rp}})}{\sum r_{ct}}, \quad (15)$$

$$a_g = a_g(\pi_i(T_{g0}, \bar{T}_g^{\text{rp}}), \ell_i^*), \quad (16)$$

$$a_x = a_x(\pi_j(T_{x0}, \bar{T}_x^{\text{rp}}), \ell_j^*), \quad (17)$$

где  $\bar{T}_g$ ,  $\bar{T}_x$  - средние температуры горячего и холодного теплоносителей;

$\pi_i$ ,  $\pi_j$ , - критерии и симплексы геометрического подобия;

$T_{g0}, T_{x0}$  - определяющие температуры, при которых рассчитываются соответствующие критерии (в качестве определяющих температур обычно используются средние температуры теплоносителей или величины, средние между ними и граничными температурами).

Поскольку уравнения (16), (17) для определения коэффициентов теплоотдачи, как правило, являются нелинейными, получить аналитическое решение системы уравнений (13) – (17) не удается. Решение может проводиться численными методами на компьютере. В результате решения находятся следующие неизвестные величины:  $\bar{T}_x^{\text{rp}}$ ,  $\bar{T}_g^{\text{rp}}$ ,  $a_x$ ,  $a_g$ ,  $\bar{Q}$ .

### **Описание установки.**

Установка состоит из двухсекционного теплообменника типа «труба в трубе», трубопроводов для подвода и отвода холодной и горячей воды, запорной арматуры и контрольно-измерительных приборов. Схема установки представлена на рисунке 5.

В теплообменнике предусматривается прямоточное движение теплоносителей. На входе в аппарат и выходе из него установлены температурные датчики, соединенные с цифровыми приборами, размещенными на панели стенда, показывающими температуры горячей начальной  $T_{gh}$ , холодной начальной  $T_{ch}$ , го-

рячей конечной Т<sub>ГК</sub>, холодной конечной Т<sub>ХК</sub> воды. Измерение объемных расходов холодной  $\dot{V}_x$  и горячей  $\dot{V}_r$  воды производится с помощью ротаметров, а регулировка расходов - с помощью вентилей ВР1 и ВР2.

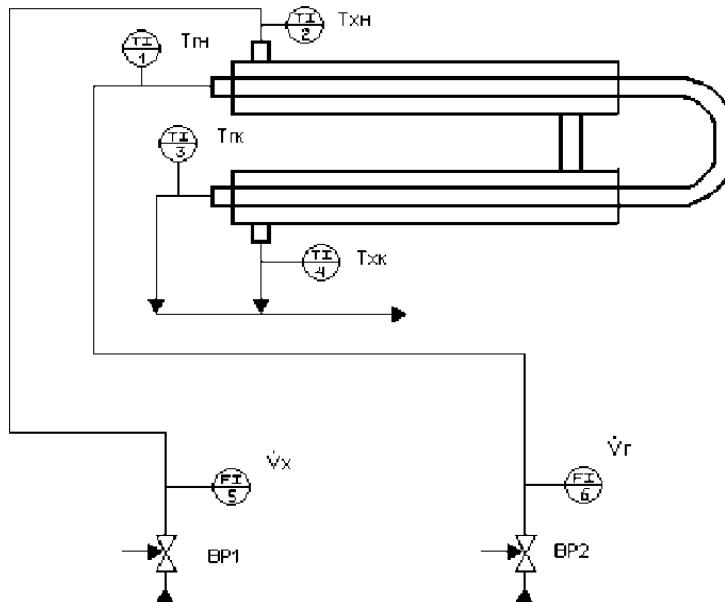


Рисунок 5 —Схема установки

Длина наружной (кожуховой) стальной трубы каждой из секций  $\ell = 1,44$  м, ее наружный диаметр  $D_h = 38$  мм, толщина стенки 2 мм ( $\varnothing 38 \times 2$ ), следовательно, ее внутренний диаметр  $D_b = 38 - 2 \times 2 = 34$  мм. Внутренняя (теплообменная) труба изготовлена из латуни ( $\varnothing 18 \times 1$ ). Поверхность теплопередачи теплообменника  $F = 0,154 \text{ м}^2$ .

В установке предусмотрены различные источники горячей воды: центральное горячее водоснабжение, проточный водонагреватель, через который может пропускаться как холодная водопроводная вода, так и горячая вода от центрального водоснабжения.

**Внимание!** Решение об использовании в работе конкретного источника горячей воды принимает преподаватель, включение установки осуществляют лаборант.

## Порядок проведения работы.

После собеседования с преподавателем устанавливаются рекомендованные им расходы теплоносителей в диапазоне **60÷100** делений ротаметра для холодной и горячей воды. Величины объемных расходов теплоносителей определяются по тарировочным графикам, размещенным на панели стенда, в течение опыта эти расходы должны поддерживаться постоянными. По истечении 10 – 15 минут, необходимых для выхода процесса теплопередачи на стационарный режим, измеряются начальные и конечные температуры теплоносителей. Результаты первого опыта заносятся в таблицу 1. Затем расход холодного теплоносителя уменьшают примерно в два раза и, через 10 – 15 минут, заносят в таблицу 1 результаты второго опыта. При возможности изменения температуры горячей воды проводят третий опыт (по решению преподавателя) с иной начальной температурой горячей воды, сохраняя расходы теплоносителей, как во втором опыте. По окончании эксперимента студенты ставят об этом в известность преподавателя и дают ему на подпись таблицу с опытными данными.

Таблица 1 – Результаты

№ опыта	Показания ротаметра		Расход воды		Температура теплоносителей			
	Для горячей воды	Для холодной воды	$\bar{V}_g \cdot 10^6$ , $\text{м}^3/\text{с}$	$\bar{V}_x \cdot 10^6$ , $\text{м}^3/\text{с}$	Тгн, $^{\circ}\text{C}$	Тгк, $^{\circ}\text{C}$	Тхн, $^{\circ}\text{C}$	Тхк, $^{\circ}\text{C}$
1								
2								
3								

## Обработка результатов опыта.

**1. Определение опытных значений коэффициента теплопередачи  $K$**  находятся для каждого опыта из уравнения теплопередачи (1). Для этого вначале рассчитываются средние движущие силы теплопередачи по (6)-(8), а затем сред-

ние температуры теплоносителей  $\bar{T}_l$ . Для теплоносителя, меньше изменяющего температуру от начального значения до конечного,

$$\bar{T}_l = \frac{T_{iH} + T_{iK}}{2}, \quad (18)$$

а для другого

$$\bar{T}_j = \bar{T}_l \mp \Delta T_{cp}. \quad (19)$$

Знак “+” в уравнении (19) используется при соответствии  $\bar{T}_l$  холодному теплоносителю, а знак “-” – горячему. По средним температурам теплоносителей из таблиц, приведенных в приложении, находятся значения удельных теплоемкостей  $c_{pr}$ ,  $c_{px}$  и плотностей  $\rho_r$ ,  $\rho_x$ .

По уравнениям (4) и (5) определяются тепловые нагрузки теплообменника  $\bar{Q}_r$  и  $\bar{Q}_x$ . При допущении об отсутствии потерь тепла в окружающую среду (горячий теплоноситель движется по внутренней трубе, калач покрыт тепловой изоляцией)  $\bar{Q}_r$  и  $\bar{Q}_x$  должны быть равны. Однако вследствие погрешности эксперимента, особенно при измерении температур, где она составляет  $0,5^{\circ}\text{C}$ , эти величины могут отличаться. Поэтому рекомендуется в качестве тепловой нагрузки использовать в (20) их среднее значение

$$\bar{Q} = \frac{(\bar{Q}_r + \bar{Q}_x)}{2}, \quad (20)$$

Найденные величины записываются в таблицу 2.

Таблица 2— Определение опытных значений коэффициента теплопередачи.

№ опыта	$\Delta T_{cp}, ^\circ\text{C}$	$\bar{T}_r, ^\circ\text{C}$	$\bar{T}_x, ^\circ\text{C}$	$\bar{Q}_r, \text{Вт}$	$\bar{Q}_x, \text{Вт}$	$\bar{Q}, \text{Вт}$	Коп, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$

**2. Определение расчетных приближенных значений коэффициента теплопередачи  $K_p$ .** Приближение заключается в пренебрежении влиянием на коэффициенты теплоотдачи изменения теплофизических свойств теплоносителей при изменении температуры от граничной до температуры ядра фазы.  $K_p$  находят из уравнения (9). Для расчетов коэффициентов теплоотдачи требуется определение режимов движения теплоносителей. Вначале находят площади по-перечного сечения  $S_g$ ,  $S_x$ , смоченные периметры  $P_{cg}$ ,  $P_{cx}$  и эквивалентные диаметры  $d_{cg}$ ,  $d_{cx}$  каналов, по которым движутся теплоносители. Поскольку горячий теплоноситель движется по теплообменной трубе круглого сечения, а холодный – по кольцевому сечению между кожуховой и теплообменной трубами (рисунок 2,3), то:

$$S_g = \pi d_B^2 / 4, \quad (21)$$

$$S_x = \pi (D_B^2 - d_H^2) / 4, \quad (22)$$

$$\Pi_{cg} = \pi d_B, \quad (23)$$

$$\Pi_{cx} = \pi (d_H + D_B), \quad (24)$$

где  $d_B$ ,  $D_B$  – внутренние диаметры теплообменной и кожуховой труб соответственно;

$d_H$  – наружный диаметр теплообменной трубы;

$d_{cg}$ ,  $d_{cx}$  находятся из (12).

Далее рассчитываются средние скорости теплоносителей:

$$\overline{w_r} = \bar{V}_r / S_r, \quad (25)$$

$$\overline{w_x} = \bar{V}_x / S_x, \quad (26)$$

а затем величины критерия Рейнольдса по (11). Заметное влияние естественной конвекции на величину коэффициента теплоотдачи при соблюдении приведенных выше условий проведения эксперимента в данном теплообменнике может

рассматриваться лишь для холодного теплоносителя. Поэтому в приближенном расчете критерий Грасгофа находится только для него (13), а коэффициент теплоотдачи горячего теплоносителя рассчитывается без учета естественной конвекции, т.е. считается, что  $Gr \cdot Pr < 8 \cdot 10^5$ . Поскольку, как показали результаты расчета, сопротивление теплопередачи определяется в основном сопротивлением теплоотдачи холодного теплоносителя, средняя движущая сила теплоотдачи холодного теплоносителя  $\Delta\bar{T}_x$  приближенно может быть найдена из средней движущей силы теплопередачи  $\Delta\bar{T}_{cp}$  и использована при расчете  $Gr_x$  в (13):

$$\Delta\bar{T}_x = 0,75\Delta T_{cp}, \quad (27)$$

В приближенном расчете все теплофизические свойства теплоносителей могут определяться при их средних температурах  $\bar{T}_g$ ,  $\bar{T}_x$  по данным, приведенным в приложении. Коэффициенты теплоотдачи горячего и холодного теплоносителей находятся из критериальных уравнений, область применения которых определяется величинами критериев  $Re$  и  $Pr \cdot Gr$ . Определяемым критерием при этом является критерий Нуссельта  $Nu$ , из которого затем по (35) находится коэффициент теплоотдачи:

$$\text{при } Re \geq 10^4, Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{rp})^{0,25}, T_{op} = \bar{T} \quad (28)$$

$$\text{при } Re \leq 2300, Gr \cdot Pr < 8 \cdot 10^5, T_{op} = (\bar{T} + \bar{T}^{gp})/2$$

для круглой трубы:

$$Nu = 1,55 (Re \cdot Pr \frac{d_3}{2\ell})^{1/3} (\mu/\mu_{rp})^{0,14}, \quad (29)$$

для кольцевого сечения при  $d/D=0,5$ ,  $x < 400$ , где  $x = Re \cdot Pr \cdot d_3 / \ell$

$$Nu = (6,15 + 0,0672 \cdot x - 8,8 \cdot 10^{-5} \cdot x^2) (\mu/\mu_{rp})^{0,14}, \quad (30)$$

$$\text{при } 2300 < Re < 10^4, Gr \cdot Pr < 8 \cdot 10^5, T_{op} = \bar{T}$$

$$Nu = (-6,1 + 4,75 \cdot 10^{-3} Re - 8,14 \cdot 10^{-8} Re^2) Pr^{0,43} (Pr/Pr_{rp})^{0,25}, \quad (31)$$

при  $Re \leq 3500$ ,  $Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5$ ,  $T_{опр} = (\bar{T} + \bar{T}^{rp})/2$

$$Nu = 0.8(Re \cdot Pr \cdot d_3 / \ell)^{0.4} (Gr \cdot Pr)^{0.1} (\mu / \mu_{rp})^{0.14}, \quad (32)$$

при  $3500 < Re < 10^4$ ,  $Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5$ ,  $T_{опр} = (\bar{T} + \bar{T}^{rp})/2$

$$Nu = 0.022 Re^{0.8} Pr^{0.4} (\mu / \mu_{rp})^n, \quad (33)$$

где  $n = 0,11$  для холодного,  $n = 0,25$  для горячего теплоносителя.

$$a = Nu \cdot \lambda / d_3, \quad (34)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности теплоносителя, определяемый при температуре  $T_{опр}$ , как и другие свойства теплоносителей в уравнениях (29)-(34), за исключением  $Pr_{rp}$  и  $\mu_{rp}$ , которые находятся при граничной температуре  $T_{rp}$ .

**Внимание!** В приближенном расчете все теплофизические свойства теплоносителей могут определяться при их средних температурах  $\bar{T}_r, \bar{T}_x$ , отношения  $(Pr / Pr_{rp}) = (\mu / \mu_{rp}) = 1$  приниматься равными единице, а в уравнении (13)  $\beta_p = 2 \cdot 10^{-4} K^{-1}$

При расчете суммарного термического сопротивления стенки  $\sum r_{ct}$  по (10) можно взять  $r_{3r} = r_{3x} = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot \text{К} / \text{Вт}$ , коэффициент теплопроводности латуни  $\lambda = 93 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ . Расчетные величины заносят в таблицу 3.

Таблица 3 – Приближенный расчет коэффициентов теплопередачи.

№ опыта	$\bar{W}_r$ , м/с	$\bar{W}_x$ , м/с	$Re_r$	$Re_x$	$Gr^x \cdot Pr^x$	$\alpha_r$ , $\text{Вт} / \text{м}^2 \text{К}$	$\alpha_x$ , $\text{Вт} / \text{м}^2 \text{К}$	$K_p$ , $\text{Вт} / \text{м}^2 \text{К}$
1								
2								
3								

Предварительно анализируется соответствие опытных и расчетных значений коэффициентов теплопередачи.

### 3. Уточненный расчет коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи.

Точный расчет коэффициентов теплоотдачи должен учитывать изменение теп-

лофизических свойств теплоносителей при изменении температуры от  $\bar{T}_{\text{гр}}$  до  $\bar{T}$ . Для этого нужно решать систему уравнений (15)–(19) с использованием в зависимости от условий соответствующих выражений (29)–(35). Кроме того, необходимы соотношения, аппроксимирующие теплофизические свойства теплоносителей в зависимости от температуры  $\rho(T)$ ,  $\mu(T)$ ,  $\lambda(T)$ ,  $\rho_c(T)$ ,  $\rho\beta(T)$ . Решение такой задачи весьма трудоемко, и поэтому проводится на компьютере.

**Внимание!** Допуск к работе на компьютере студенты получают лишь после проверки преподавателем их собственных расчетов и при отсутствии в них грубых ошибок.

### **Анализ результатов.**

1. Проверяется соответствие собственных расчетов, представленных в таб. 2 и 3, результатам, полученным с помощью компьютера. В случае расхождения находятся ошибки.
2. Сравниваются результаты приближенного и точного расчетов коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи.
3. Анализируется и объясняется зависимость коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи от расхода холодного теплоносителя и разности температур теплоносителей, если проводился третий опыт.

### **Контрольные вопросы:**

1. Какие процессы называются теплообменными? Перечислите их.
2. Дайте определения понятий теплоотдачи и теплопередачи, запишите уравнения, описывающие эти процессы, дайте определения величин, входящих в уравнения.
3. Запишите и поясните уравнения теплового баланса.

4. С помощью каких механизмов может осуществляться перенос тепла и как они влияют на величину коэффициента теплоотдачи?
5. Как можно найти опытное и расчетное значения коэффициентов теплопередачи?
6. Поясните схему лабораторной установки и конструкцию теплообменника типа «труба в трубе».
7. От чего зависят коэффициенты теплопередачи, как их можно увеличить в данном теплообменнике?
8. Что произойдет с коэффициентом теплопередачи при условиях второго опыта, если увеличить на четверть диаметр теплообменной трубы?

## Лабораторная работа № 5

**Тема:** Изучение теплообмена в теплообменнике с плавающей головкой.

**Цель работы:** 1) ознакомиться со схемой установки и конструкцией теплообменника с плавающей головкой; 2) найти опытные и расчетные значения коэффициента теплопередачи при различных условиях проведения эксперимента; 3) проанализировать влияние различных факторов на коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи.

Теплообмен – перенос энергии в форме тепла. Теплообменными называются процессы, скорость протекания которых определяется скоростью подвода или отвода тепла.

В теплообменных процессах тепло передается от одних сред к другим, имеющих общее название теплоносители. Теплообмен может осуществляться как при непосредственном контакте теплоносителей, так и через разделяющую их стенку. Теплопередача – перенос тепла от одного теплоносителя к другому через границу раздела фаз. Теплоотдача – перенос тепла внутри теплоносителя от границы раздела фаз к ядру фазы или в обратном направлении. В интегральной форме уравнения теплопередачи (1) и теплоотдачи (2) можно записать:

$$\bar{Q} = K \cdot F \cdot (\bar{T}_\Gamma - \bar{T}_X) = K \cdot F \cdot \Delta T_{\text{ср}} , \quad (1)$$

$$\bar{Q} = a_\Gamma \cdot F \cdot (\bar{T}_\Gamma - \bar{T}_\Gamma^{\text{рп}}) = a_X \cdot F \cdot (\bar{T}_X^{\text{рп}} - \bar{T}_X) , \quad (2)$$

где  $\bar{Q}$  – тепловая нагрузка (количество тепла, передаваемое через границу раздела фаз за единицу времени);

$F$  – поверхность теплопередачи;

$\Delta T_{\text{ср}} = \bar{T}_\Gamma - \bar{T}_X$  – средняя по поверхности  $F$  разность температур горячего  $T_\Gamma$  и холодного  $T_X$  теплоносителей (движущая сила процесса теплопередачи);  $\bar{T}^{\text{рп}} - \bar{T}$  – средняя по поверхности  $F$  разность температур теплоносителя в непо-

средственной близости от границы раздела фаз  $T_g^{rp}$ ,  $T_x^{rp}$  и в ядре фазы  $T_g$ ,  $T_x$  (движущая сила процесса теплоотдачи);

$K$  - коэффициент теплопередачи (количество тепла, переносимое от одного теплоносителя к другому за единицу времени через единицу поверхности в расчете на единицу движущей силы);

$a_g$ ,  $a_x$  - коэффициенты теплоотдачи горячего и холодного теплоносителей (количество тепла, передаваемое от границы раздела фаз к ядру фазы или в обратном направлении за единицу времени, через единицу поверхности в расчете на единицу движущей силы).

Тепловая нагрузка теплообменника может быть найдена из уравнений теплового баланса, в соответствии с которыми она равна количеству тепла, отдаваемому за единицу времени горячим теплоносителем, а также количеству тепла, воспринимаемому за единицу времени холодным теплоносителем. Допуская отсутствие потерь тепла в окружающую среду, при неизменном фазовом состоянии теплоносителей эти уравнения можно записать в виде:

$$\bar{Q} = \overline{Q_g} = \overline{Q_x}, \quad (3)$$

$$\overline{Q_g} = \bar{V}_g \cdot \rho_g \cdot c_g \cdot (T_{gh} - T_{gk}), \quad (4)$$

$$\overline{Q_x} = \bar{V}_x \cdot \rho_x \cdot c_x \cdot (T_{xh} - T_{xk}), \quad (5)$$

где  $\bar{V}_g$ ,  $\bar{V}_x$  - объемные расходы;

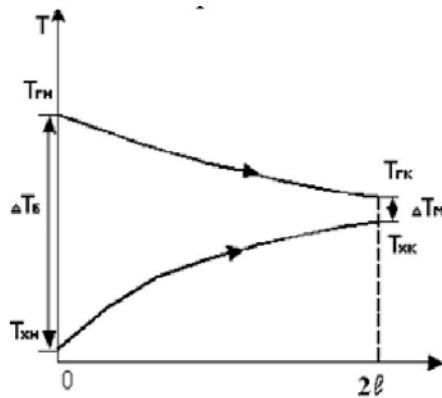
$\rho_g$ ,  $\rho_x$  - плотности;

$C_g$ ,  $C_x$  - удельные теплоемкости;

$T_{gh}$ ,  $T_{xh}$  - начальные температуры;

$T_{gk}$ ,  $T_{xk}$  - конечные температуры горячего и холодного теплоносителей.

Средняя движущая сила теплопередачи при прямоточном движении теплоносителей и допущении, что структура их потоков близка к модели идеального вытеснения, может определяться как средняя логарифмическая величина. Изменение температур теплоносителей по длине аппарата представлено на рисунке 1.



$2\ell$  - длина труб в обеих секциях теплообменника, изображенного на рисунке 2;  
 $\Delta T_6$  и  $\Delta T_m$  - разности температур теплоносителей на концах аппарата.

Рисунок— 1 Распределение температур по длине аппарата при прямоточном движении теплоносителей:

$$\Delta T_{cp} = \frac{\Delta T_6 - \Delta T_m}{\ln \frac{T_6}{T_m}}, \quad (6)$$

$$\Delta T_6 = T_{rh} - T_{xh}, \quad (7)$$

$$\Delta T_m = T_{rk} - T_{xk}, \quad (8)$$

Измерив в опыте расходы теплоносителей, а также их начальные и конечные температуры и зная величину поверхности теплопередачи, из уравнения (1) с использованием (3) – (8) может быть найдено опытное значение коэффициента теплопередачи  $K_{op}$ .

Расчетное значение коэффициента теплопередачи  $K_p$  в случае теплопередачи через плоскую стенку можно найти с использованием коэффициентов теп-

лоотдачи и суммарного термического сопротивления стенки  $\sum r_{ct}$ , которое определяется термическим сопротивлением самой стенки, а также термическими сопротивлениями загрязнений со стороны каждого теплоносителя:

$$K_p = \frac{1}{\frac{1}{a_r} + \sum r_{ct} + \frac{1}{a_x}}, \quad (9)$$

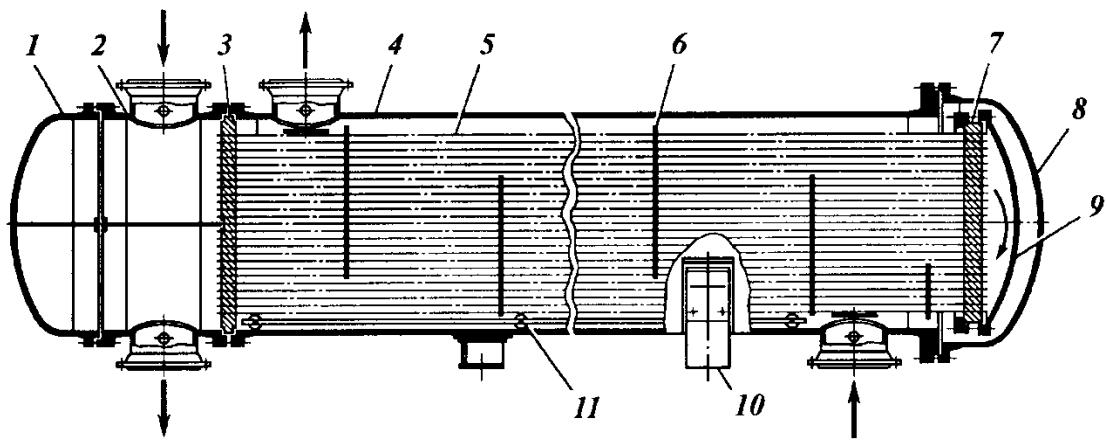
$$\sum r_{ct} = \frac{\delta}{\lambda} + r_{3r} + r_{3x}, \quad (10)$$

где  $\delta, \lambda$  - толщина и коэффициент теплопроводности стенки;

$r_{3r}, r_{3x}$  - термические сопротивления загрязнений со стороны горячего и холодного теплоносителей.

Наибольшую сложность при расчете коэффициентов теплопередачи составляет определение коэффициентов теплоотдачи. Перенос тепла внутри теплоносителя может осуществляться за счет четырех механизмов: молекулярного, конвективного, турбулентного и излучением. Последним в жидких средах можно пренебречь. Коэффициент теплоотдачи зависит от формы и размера канала, по которому движется теплоноситель, теплофизических свойств теплоносителя и характера его движения.

Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с плавающей головкой (с подвижной трубной решеткой) являются наиболее распространенным типом поверхностных аппаратов. Подвижная трубная решетка позволяет трубному пучку свободно перемещаться независимо от корпуса. В аппаратах этой конструкции температурные напряжения могут возникать лишь при существенном различии температур трубок. Трубчатый пучок может опираться на ближайшую к плавающей головке перегородку, имеющую большую толщину, чем у других перегородок, а при значительных размерах и массе пучок опирают на катковые опоры.



- 1 — крышка распределительной камеры; 2 — распределительная камера;  
 3 — неподвижная трубная решетка; 4 — кожух; 5 — теплообменная труба;  
 6 — поперечная перегородка; 7 — подвижная трубная решетка; 8 — крышка ко-  
 жуха; 9 — крышка плавающей головки; 10 — опора; 11 — катковая опора труб-  
 чатого пучка

Рисунок—2 Кожухотрубчатый теплообменник с плавающей головкой

Теплопередача между теплоносителями происходит через стенку внутренней (теплообменной) трубы на участке контакта теплоносителей длиной  $\ell$  для каждой из секций. Судить о характере изотермического движения жидкости в канале можно по величине критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{\bar{W} \cdot d_3 \cdot \rho}{\mu}, \quad (11)$$

$$d_3 = \frac{4S}{\Pi_c}, \quad (12)$$

где  $\bar{W}$  - средняя по сечению канала скорость жидкости;

$\rho, \mu$  - плотность и динамический коэффициент вязкости жидкости;

$S, d_3, \Pi_c$  - площадь поперечного сечения, эквивалентный диаметр и смоченный периметр канала. При  $Re < 2300$  в каналах круглого и кольцевого сечения наблюдается ламинарный режим течения, при  $2300 < Re < 10^4$  - переходный,

при  $Re > 10^4$  - развитый турбулентный. При неизотермическом течении (неоднородности поля температур, наблюдавшейся при теплообмене) характер движения усложняется. Так, например, в горизонтальных круглом и кольцевом каналах возникают циркуляционные конвективные токи, вызванные естественной конвекцией (рисунок 3, лабораторная работа №4).

Заметное влияние на теплоотдачу естественная конвекция начинает оказывать при  $(Gr \cdot Pr) > 8 \cdot 10^5$ :

$$Gr = g \cdot d^3 \cdot \beta_p \cdot \rho^2 \cdot \frac{\Delta T}{\mu^2}, \quad (13)$$

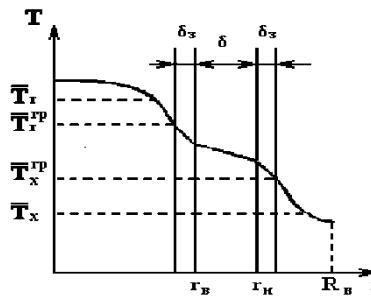
$$Pr = \mu \cdot \frac{c_p}{\lambda}, \quad (14)$$

где  $Gr$  и  $Pr$  - критерии Грасгофа и Прандтля соответствующего теплоносителя,

$g$  - ускорение свободного падения,

$\beta_p$  - коэффициент объемного расширения,

$\Delta T$  - движущая сила теплоотдачи.



$r_b$ ,  $r_h$  - внутренний и наружный радиусы теплообменной трубы,

$R_b$  - внутренний радиус кожуховой трубы.

Рисунок—3 Изменение температуры в процессе теплопередачи через стенку теплообменной трубы толщиной  $\delta$  при наличии загрязнений толщиной  $\delta_3$

Наименьшие коэффициенты теплоотдачи наблюдаются при ламинарном режиме движения в каналах при отсутствии влияния естественной конвекции, так как перенос тепла в направлении, перпендикулярном поверхности теплопередачи, осуществляется лишь за счет молекулярного механизма. Возникновение конвективных токов вызывает дополнительный перенос тепла за счет конвективного механизма и, следовательно, увеличению коэффициентов теплоотдачи. Переход от ламинарного к турбулентному режиму движения приводит к увеличению коэффициентов теплоотдачи за счет дополнительного переноса тепла турбулентным механизмом. В инженерной практике коэффициенты теплоотдачи рассчитывают с использованием критериальных уравнений. Сложность таких расчетов заключается в необходимости знания средних граничных температур  $\bar{T}_x^{\text{gp}}$ ,  $\bar{T}_r^{\text{gp}}$  теплоносителей (рисунок 3), входящих в критериальное уравнение и учитывающих изменение теплофизических свойств теплоносителя от ядра до границы раздела фаз. Определить их, а также коэффициенты теплоотдачи можно из решения системы пяти уравнений:

$$\bar{Q} = a_r \cdot F \cdot (\bar{T}_r^{\text{gp}} - \bar{T}_x^{\text{gp}}), \quad (15)$$

$$\bar{Q} = a_x \cdot F \cdot (\bar{T}_x^{\text{gp}} - \bar{T}_x^{\text{gp}}), \quad (16)$$

$$\bar{Q} = \frac{F(\bar{T}_r^{\text{gp}} - \bar{T}_x^{\text{gp}})}{\sum r_{\text{ct}}}, \quad (17)$$

$$a_r = a_r(\pi_i(T_{r0}, \bar{T}_r^{\text{gp}}), \ell_i^*), \quad (18)$$

$$a_x = a_x(\pi_j(T_{x0}, \bar{T}_x^{\text{gp}}), \ell_j^*), \quad (19)$$

где  $\bar{T}_r$ ,  $\bar{T}_x$ - средние температуры горячего и холодного теплоносителей;  $\pi_i$ ,

$\pi_j$ , - критерии и симплексы геометрического подобия;

$T_{r0}, T_{x0}$  - определяющие температуры, при которых рассчитываются соответствующие критерии (в качестве определяющих температур обычно используются

средние температуры теплоносителей или величины, средние между ними и граничными температурами).

Поскольку уравнения (18), (19) для определения коэффициентов теплоотдачи, как правило, являются нелинейными, получить аналитическое решение системы уравнений (15) – (19) не удается. Решение может проводиться численными методами на компьютере. В результате решения находятся следующие неизвестные величины:  $\bar{T}_x^{\text{гр}}$ ,  $\bar{T}_\Gamma^{\text{гр}}$ ,  $a_x$ ,  $a_\Gamma$ ,  $\bar{Q}$ .

### **Описание установки.**

Установка состоит из двухсекционного теплообменника типа «труба в трубе», трубопроводов для подвода и отвода холодной и горячей воды, запорной арматуры и контрольно-измерительных приборов. Схема установки представлена на рисунке 4.

В теплообменнике предусматривается прямоточное движение теплоносителей. На входе в аппарат и выходе из него установлены температурные датчики, соединенные с цифровыми приборами, размещенными на панели стенда, показывающими температуры горячей начальной  $T_{\Gamma\text{н}}$ , холодной начальной  $T_{x\text{н}}$ , горячей конечной  $T_{\Gamma\text{к}}$ , холодной конечной  $T_{x\text{к}}$  воды. Измерение объемных расходов холодной  $\bar{V}_x$  и горячей  $\bar{V}_\Gamma$  воды производится с помощью ротаметров, а регулировка расходов - с помощью вентилей ВР1 и ВР2.

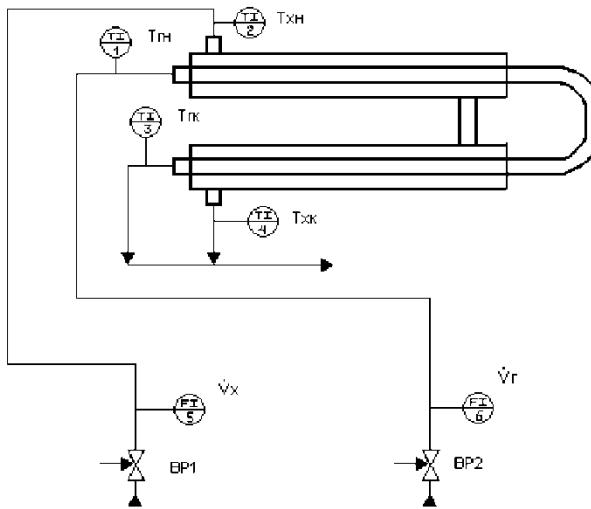


Рисунок 4 – Схема установки

Длина наружной (кожуховой) стальной трубы каждой из секций  $\ell = 1,44$  м, ее наружный диаметр  $D_H = 38$  мм, толщина стенки 2 мм ( $\varnothing 38 \times 2$ ), следовательно, ее внутренний диаметр  $D_B = 38 - 2 \times 2 = 34$  мм. Внутренняя (теплообменная) труба изготовлена из латуни ( $\varnothing 18 \times 1$ ). Поверхность теплопередачи теплообменника  $F = 0,154 \text{ м}^2$ .

В установке предусмотрены различные источники горячей воды: центральное горячее водоснабжение, проточный водонагреватель, через который может пропускаться как холодная водопроводная вода, так и горячая вода от центрального водоснабжения.

**Внимание!** Решение об использовании в работе конкретного источника горячей воды принимает преподаватель, включение установки осуществляют лаборант.

### Порядок проведения работы.

После собеседования с преподавателем устанавливаются рекомендованные им расходы теплоносителей в диапазоне **60÷100** делений ротаметра для холодной и горячей воды. Величины объемных расходов теплоносителей определяются по тарировочным графикам, размещенным на панели стенда, в течение

опыта эти расходы должны поддерживаться постоянными. По истечении 10 – 15 минут, необходимых для выхода процесса теплопередачи на стационарный режим, измеряются начальные и конечные температуры теплоносителей. Результаты первого опыта заносятся в таблицу 1. Затем расход холодного теплоносителя уменьшают примерно в два раза и, через 10 – 15 минут, заносят в таблицу 1 результаты второго опыта. При возможности изменения температуры горячей воды проводят третий опыт (по решению преподавателя) с иной начальной температурой горячей воды, сохраняя расходы теплоносителей, как во втором опыте. По окончании эксперимента студенты ставят об этом в известность преподавателя и дают ему на подпись таблицу с опытными данными.

Таблица 1 – Результаты

№ опыта	Показания ротаметра		Расход воды		Температура теплоносителей			
	Для горячей воды	Для холодной воды	$\bar{V}_g \cdot 10^6$ , $\text{м}^3/\text{с}$	$\bar{V}_x \cdot 10^6$ , $\text{м}^3/\text{с}$	Тгн, $^{\circ}\text{C}$	Тгк, $^{\circ}\text{C}$	Тхн, $^{\circ}\text{C}$	Тхк, $^{\circ}\text{C}$
1								
2								
3								

### Обработка результатов опыта.

**1. Определение опытных значений коэффициента теплопередачи  $K$**  находятся для каждого опыта из уравнения теплопередачи (1). Для этого вначале рассчитываются средние движущие силы теплопередачи по (6)-(8), а затем средние температуры теплоносителей  $\bar{T}_l$ . Для теплоносителя, меньшее изменяющего температуру от начального значения до конечного,

$$\bar{T}_l = \frac{T_{iH} + T_{iK}}{2}, \quad (20)$$

а для другого

$$\bar{T}_J = \bar{T}_l \mp \Delta T_{\text{ср.}} \quad (20a)$$

Знак “+” в уравнении (20а) используется при соответствии і холодному теплоносителю, а знак “–” – горячemu. По средним температурам теплоносителей из таблиц, приведенных в приложении, находятся значения удельных теплоемкостей  $c_{p\Gamma}$ ,  $c_{px}$  и плотностей  $\rho_\Gamma$ ,  $\rho_x$ .

По уравнениям (4) и (5) определяются тепловые нагрузки теплообменника  $\bar{Q}_\Gamma$  и  $\bar{Q}_x$ . При допущении об отсутствии потерь тепла в окружающую среду (горячий теплоноситель движется по внутренней трубе, калач покрыт тепловой изоляцией)  $\bar{Q}_\Gamma$  и  $\bar{Q}_x$  должны быть равны. Однако вследствие погрешности эксперимента, особенно при измерении температур, где она составляет 0 0.5 С, эти величины могут отличаться. Поэтому рекомендуется в качестве тепловой нагрузки использовать в (1) их среднее значение

$$\bar{Q} = \frac{(\bar{Q}_\Gamma + \bar{Q}_x)}{2}, \quad (21)$$

Найденные величины записываются в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты Определение опытных значений коэффициента теплопередачи.

№ опыта	$\Delta T_{cp}$ , °C	$\bar{T}_\Gamma$ , °C	$\bar{T}_x$ , °C	$\bar{Q}_\Gamma$ , Вт	$\bar{Q}_x$ , Вт	$\bar{Q}$ , Вт	Коп, Вт/м <sup>2</sup> К

**2. Определение расчетных приближенных значений коэффициента теплопередачи Кр.** Приближение заключается в пренебрежении влиянием на коэффициенты теплоотдачи изменения теплофизических свойств теплоносителей при изменении температуры от граничной до температуры ядра фазы. Кр находят из уравнения (9). Для расчетов коэффициентов теплоотдачи требуется определение режимов движения теплоносителей. Вначале находят площади поперечного сечения  $S_\Gamma$ ,  $S_x$ , смоченные периметры  $P_{sg}$ ,  $P_{sx}$  и эквивалентные диаметры  $d_{sg}$ ,  $d_{sx}$  каналов, по которым движутся теплоносители. Поскольку горячий теплоноситель движется по теплообменной трубе круглого сечения, а холодный

– по кольцевому сечению между кожуховой и теплообменной трубами (рисунок 2, 3), то:

$$S_r = \pi d_B^2/4, \quad (22)$$

$$S_x = \pi(D_B^2 - d_H^2)/4, \quad (23)$$

$$\Pi_{cr} = \pi d_B, \quad (24)$$

$$\Pi_{cx} = \pi(d_H + D_B), \quad (25)$$

где  $d_B$ ,  $D_B$  - внутренние диаметры теплообменной и кожуховой труб соответственно;

$d_H$  - наружный диаметр теплообменной трубы;

$d_{cr}$ ,  $d_{cx}$  находятся из (12).

Далее рассчитываются средние скорости теплоносителей:

$$\bar{w}_r = \bar{V}_r/S_r, \quad (26)$$

$$\bar{w}_x = \bar{V}_x/S_x, \quad (27)$$

а затем величины критерия Рейнольдса по (11). Заметное влияние естественной конвекции на величину коэффициента теплоотдачи при соблюдении приведенных выше условий проведения эксперимента в данном теплообменнике может рассматриваться лишь для холодного теплоносителя. Поэтому в приближенном расчете критерий Грасгофа находится только для него (13), а коэффициент теплоотдачи горячего теплоносителя рассчитывается без учета естественной конвекции, т.е. считается, что  $Gr \cdot Pr < 8 \cdot 10^5$ . Поскольку, как показали результаты расчета, сопротивление теплопередачи определяется в основном сопротивлением теплоотдачи холодного теплоносителя, средняя движущая сила теплоотдачи холодного теплоносителя  $\Delta \bar{T}_x$  приближенно может быть найдена из средней движущей силы теплопередачи  $\Delta \bar{T}_{cp}$  и использована при расчете  $Gr_x$  в (13):

$$\overline{\Delta T_x} = 0,75 \Delta T_{\text{ср}} , \quad (28)$$

В приближенном расчете все теплофизические свойства теплоносителей могут определяться при их средних температурах  $\bar{T}_g$ ,  $\bar{T}_x$  по данным, приведенным в приложении. Коэффициенты теплоотдачи горячего и холодного теплоносителей находятся из критериальных уравнений, область применения которых определяется величинами критериев  $Re$  и  $Pr \cdot Gr$ . Определяемым критерием при этом является критерий Нуссельта  $Nu$ , из которого затем по (35) находится коэффициент теплоотдачи:

$$\text{при } Re \geq 10^4, Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_{\text{рп}})^{0,25}, T_{\text{опр}} = \bar{T} \quad (29)$$

$$\text{при } Re \leq 2300, Gr \cdot Pr < 8 \cdot 10^5, T_{\text{опр}} = (\bar{T} + \bar{T}^{rp})/2$$

для круглой трубы:

$$Nu = 1,55 (Re \cdot Pr \frac{d_3}{2\ell})^{1/3} (\mu/\mu_{\text{рп}})^{0,14}, \quad (30)$$

для кольцевого сечения при  $d/D=0,5$ ;  $x < 400$ , где  $x = Re \cdot Pr \cdot d_3 / \ell$

$$Nu = (6,15 + 0,0672 \cdot x - 8,8 \cdot 10^{-5} \cdot x^2) (\mu/\mu_{\text{рп}})^{0,14}, \quad (31)$$

$$\text{при } 2300 < Re < 10^4, Gr \cdot Pr < 8 \cdot 10^5, T_{\text{опр}} = \bar{T}$$

$$Nu = (-6,1 + 4,75 \cdot 10^{-3} Re - 8,14 \cdot 10^{-8} Re^2) Pr^{0,43} (Pr/Pr_{\text{рп}})^{0,25}, \quad (32)$$

$$\text{при } Re \leq 3500, Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5, T_{\text{опр}} = (\bar{T} + \bar{T}^{rp})/2$$

$$Nu = 0,8 (Re \cdot Pr \cdot d_3 / \ell)^{0,4} (Gr \cdot Pr)^{0,1} (\mu/\mu_{\text{рп}})^{0,14}, \quad (33)$$

$$\text{при } 3500 < Re < 10^4, Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5, T_{\text{опр}} = (\bar{T} + \bar{T}^{rp})/2$$

$$Nu = 0,022 Re^{0,8} Pr^{0,4} (\mu/\mu_{\text{рп}})^n, \quad (34)$$

где  $n = 0,11$  для холодного,  $n = 0,25$  для горячего теплоносителя.

$$a = Nu \cdot \lambda / d_3, \quad (35)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности теплоносителя, определяемый при температуре  $T_{\text{опр}}$ , как и другие свойства теплоносителей в уравнениях (29)-(34), за исключением  $Pr_{\text{гр}}$  и  $\mu_{\text{гр}}$ , которые находятся при граничной температуре  $T_{\text{гр}}$ .

**Внимание!** В приближенном расчете все теплофизические свойства теплоносителей могут определяться при их средних температурах  $\bar{T}_r, \bar{T}_x$ , отношения  $(Pr/ Pr_{\text{гр}}) = (\mu / \mu_{\text{гр}}) = 1$  приниматься равными единице, а в уравнении (13)  $\beta_p = 2 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$

При расчете суммарного термического сопротивления стенки  $\sum \Gamma_{\text{ст}}$  по (10) можно взять  $r_{\text{зг}} = r_{\text{зх}} = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}\cdot\text{К/Вт}$ , коэффициент теплопроводности латуни  $\lambda = 93 \text{ Вт} / (\text{м}\cdot\text{К})$ . Расчетные величины заносят в таблицу 3.

Таблица 3 – Приближенный расчет коэффициентов теплопередачи.

№ опыта	$\bar{w}_r, \text{м/с}$	$\bar{w}_x, \text{м/с}$	$Re_r$	$Re_x$	$Gr^x \cdot Pr^x$	$\alpha_r, \text{Вт/м}^2\text{К}$	$\alpha_x, \text{Вт/м}^2\text{К}$	$K_p, \text{Вт/м}^2\text{К}$
1								
2								
3								

Предварительно анализируется соответствие опытных и расчетных значений коэффициентов теплопередачи.

### 3. Уточненный расчет коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи.

Точный расчет коэффициентов теплоотдачи должен учитывать изменение теплофизических свойств теплоносителей при изменении температуры от  $\bar{T}_{\text{гр}}$  до  $\bar{T}$ . Для этого нужно решать систему уравнений (15)-(19) с использованием в зависимости от условий соответствующих выражений (29)–(35). Кроме того, необходимы соотношения, аппроксимирующие теплофизические свойства теплоносителей в зависимости от температуры  $\rho(T)$ ,  $\mu(T)$ ,  $\lambda(T)$ ,  $\rho_c(T)$ ,  $\beta(T)$ . Решение такой задачи весьма трудоемко, и поэтому проводится на компьютере.

**Внимание!** Допуск к работе на компьютере студенты получают лишь после проверки преподавателем их собственных расчетов и при отсутствии в них грубых ошибок.

## **Анализ результатов.**

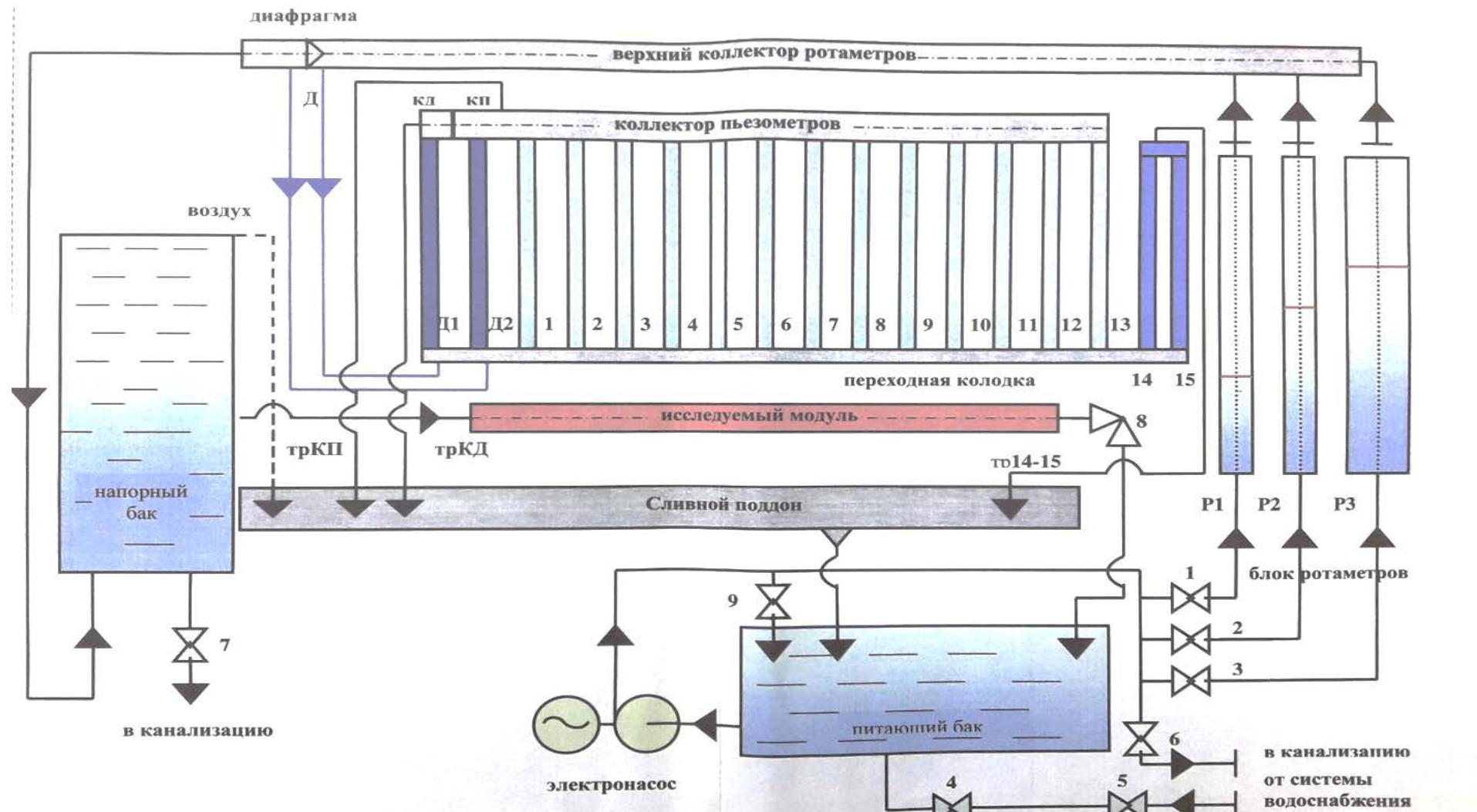
1. Проверяется соответствие собственных расчетов, представленных в таб. 2 и 3, результатам, полученным с помощью компьютера. В случае расхождения находятся ошибки.
2. Сравниваются результаты приближенного и точного расчетов коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи.
3. Анализируется и объясняется зависимость коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи от расхода холодного теплоносителя и разности температур теплоносителей, если проводился третий опыт.

## **Контрольные вопросы:**

1. Какие процессы называются теплообменными? Перечислите их.
2. Дайте определения понятий теплоотдачи и теплопередачи, запишите уравнения, описывающие эти процессы, дайте определения величин, входящих в уравнения.
3. Запишите и поясните уравнения теплового баланса.
4. С помощью каких механизмов может осуществляться перенос тепла и как они влияют на величину коэффициента теплоотдачи?
5. Как можно найти опытное и расчетное значения коэффициентов теплопередачи?
6. Поясните схему лабораторной установки и конструкцию теплообменника с плавающей головкой.
7. От чего зависят коэффициенты теплопередачи, как их можно увеличить в данном теплообменнике?

Приложение 1

КОНСТРУКЦИЯ И ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО СТЕНДА ТИПА ТМЖ 2



Гидравлический универсальный стенд **ТМЖ 2** предназначен для исследования гидродинамических явлений при проведении лабораторных работ. Принцип работы стенда заключается в изменении структуры и параметров потока жидкости, протекающей через исследуемый модуль при различных условиях.

**В состав стендад входят:**

**1. Питающий бак** – служит приемной емкостью электронасоса. Заполнение бака производится через донное отверстие открытием вентиля **4** и **5** от системы централизованного водоснабжения (после заполнения бака вентиль закрывается). Уровень заполнения бака определяется по риске, нанесенной на поплавковом стержне, при опускании его в бак через отверстие поддона. Слив воды из питающего бака по окончании работы при закрытых вентилях **1,2, 3** и открытом вентиле **6** осуществляется в канализацию при помощи электронасоса.

**2. Электронасос** (от сети переменного тока напряжением **220 В** – служит для запитки всей гидравлической системы водой:

- блока ротаметров;
- блока пьезометров;
- напорного бака.

Всасывающий патрубок электронасоса посредством гибкого рукава соединен с питающим баком; выходной напорный патрубок насоса – с нижним питающим коллектором ротаметров. Включение и отключение электронасоса осуществляется автоматическим выключателем установленным на передней панели стендад.

**3. Блок ротаметров Р1 Р2 Р3 типа РМ** на рабочее избыточное давление **0,63 МПа** с различными диапазонами измерения расхода жидкости, соответственно:

- **РМ – IV – 0,16**  $\frac{m^3}{ч}$ ;

- **РМ – IV – 0,4**  $\frac{m^3}{u}$ ;

- **РМ – IV – 1,6**  $\frac{m^3}{u}$ .

Запитка ротаметров водой осуществляется от электронасоса через нижний коллектор ротаметров посредством вентилей **1, 2, 3**, которые служат для распределения потока жидкости в один из трех ротаметров.

Выходные фланцы ротаметров **P1 P2 P3** через переходник соединены с верхним коллектором ротаметров и мерной диафрагмой, измеряющей расходы жидкости в системе во время опыта.

**4. Напорный бак** – служит для создания постоянного по структуре потока жидкости, поступающего в исследуемый модуль через выходной патрубок бака. Заполнение бака водой осуществляется от верхнего коллектора ротаметров при включении электронасоса. Удаление воздуха из верхней части бака, по мере его заполнения водой, осуществляется через штуцер по гибкой трубке **TP**. Слив воды из напорного бака осуществляется через вентиль **7** в систему канализации.

**5. Панель пьезометров** в составе семнадцати стеклянных трубок (пьезометров) со шкалами (**D<sub>1</sub>; D<sub>2</sub>; 1-15**):

- пьезометры **D<sub>1</sub>** и **D<sub>2</sub>** – измеряют перепад давлений на измерительной диафрагме, установленной в верхнем коллекторе ротаметров;

- пьезометры **1-15** измеряют давление в исследуемом модуле.

Нижние концы пьезометров **D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, 1-15** выведены на переходную колодку со штуцерами.

Верхние концы пьезометров подсоединены к штуцерам коллектора пьезометров, представляющего собой глухую трубу со встроенной внутренней перегородкой, которая делит коллектор на две камеры:

- левая камера **КД** коллектора пьезометров служит для занапоривания пьезометров  $D_1$  и  $D_2$ , соединенных с измерительной диафрагмой; слив жидкости из камеры в поддон осуществляется по гибкой трубке **трКД**;

- правая камера **КП** коллектора пьезометров соединяется с пьезометрами **1-15** исследуемого модуля. Слив жидкости из камеры в поддон осуществляется по гибкой трубке **тр КП**.

При заполнении системы жидкостью, посредством трубы **тр3** осуществляется выравнивание давлений на диафрагме, и трубок **тр2** и **тр4** в проточных каналах исследуемого модуля.

**6.** Восемь сменных модулей, позволяющих выполнять лабораторные работы в объеме учебной программы (таблица 1).

Модули представляют собой проточные каналы различной конфигурации, обеспечивающие нужную структуру течения потока и значений его параметров (скоростей, давлений, расходов):

- входной патрубок исследуемого модуля подсоединяется к напорному баку через гибкий рукав;

- выходной патрубок исследуемого модуля соединяется с игольчатым вентилем **8**, который служит для регулирования расхода жидкости, протекающей через исследуемый модуль.

Для исследования характеристик потока жидкости, в контрольных точках поперечного сечения проточного канала модуля (в которых снимаются исследуемые параметры), предусмотрены штуцеры для подсоединения гибких трубок к пьезометрам **1-15** переходной колодки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сугак А.В. Оборудование нефтеперерабатывающего производства: учеб.пособие. М.: Академия, 2012. 336 с.
2. Лабораторный практикум по процессам и аппаратам химической технологии: Учебное пособие. Под ред. проф. Г.С. Дьяконова; Казан. гос. технол. ун-т. Казань, 2005. 236с.
3. Эмирджанов Р.Т. Основы технологических расчетов в нефтепереработке и нефтехимии. М.: Химия, 1989. 985с.
4. Скобло А.И. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии: учеб.пособие. М.: Недра, 2000. 663 с. [Электронный ресурс]. Доступ из электронной библиотеки «Нефтегазовая отрасль. Эл.книги».
5. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1971. 784 с.
6. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. 1, 2 ч. М.: Химия, 2002. 400 с., 368 с.
7. Рамм В.П. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 656 с.
8. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Л.: Химия, 1965. 308 с.
9. Александров И.А. Массопередача при ректификации и абсорбции многокомпонентных смесей. - Л.: Химия, 1975. 320с.
10. Скобло А.И., Трегубова И.А., Молоканов Ю.К. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. – М.: Химия, 1982. 584 с. 9.
11. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая школа, 1979. 439 с.
10. Комиссаров Ю.А., Глебов М.Б., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Химикотехнологические процессы. Теория и эксперимент. – М.: Химия, 1999. 358 с.
12. Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.В. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1967. 848 с.

13. Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. М: Химия, 1974. 440 с.
14. Олевский В.М., Ручинский В.Р. Ректификация термически нестойких продуктов. М: Химия, 1972. 200 с. 14. Тепломассобменные процессы: Руководство к лаб. работам / Ф.А. Мусташкин, И.В. Шарнин, Л.К. Сафиуллина; КХТИ. Казань, 1985. 40 с.
15. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967. 412 с.
16. 235
17. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1987. 576 с.
18. П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк, М. И. Курочкина. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). С.-П.: Химия, 1993. 496 с.
19. Романков П. Г., Курочкина М. И. Гидромеханические процессы химической технологии. М.: Химия, 1974. 288 с.
20. Романков П. Г. Руководство к практическим занятиям в лаборатории процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1976. 255 с.
21. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 471 с.
22. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 429 с.
23. Ирисов А. С. Испаряемость топлив для поршневых двигателей и методы ее исследования. М.: Гостоптехиздат, 1955. 303 с.
24. Муштаев В. И., Ульянов В. М. Сушка дисперсных материалов. – М.: Химия, 1988.
25. Явления переноса: Учебное пособие/ А.И. Разинов, Г.С. Дьяконов Казан.гос.технол.ун-т. Казань, 2002. 136 с.
26. Забродский С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожженном слое. М.: Госэнергоиздат, 1963. 488 с.

27. Справочник химика, Т. III. М.: Химия, 1964. 1005 с. 27. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности. /Под ред. И.С. Павлюшенко. Л.: Госхимиздат, 1963. 416 с. 28. Перри Дж. Справочник инженера-химика, Т.1. Л.: Химия, 1969. 639 с.
28. Перри Дж. Справочник инженера-химика. Т. 2. Л: Химия, 1969. 504 с.

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

СОГЛАСОВАНО

Старший методист

*Лоне*

М.В. Отс

Методист по ИТ

*Сергеев -*

Т.А. Сергеева