

ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ
«НОВОКУЙБЫШЕВСКИЙ НЕФТЕХИМИЧЕСКИЙ ТЕХНИКУМ»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по УР

_____ В. Б. Семисаженова

« _____ » _____ 2015 г.

ОСНОВЫ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Методическое пособие для студентов и преподавателей

Новокуйбышевск

2015 г.

Рассматриваются теоретические основы процесса теплообмена, теплоотдачи и теплопередачи и даны пояснения к выполнению лабораторных работ по теме.

Методическое пособие имеет практическую значимость обучающихся по специальностям 18.02.09 Переработка нефти и газа и 18.02.06 Химическая технология органических веществ.

Предназначено для самостоятельной работы студентов ГАПОУ СО «ННХТ».

СОГЛАСОВАНО

Предметно - цикловой комиссией

Председатель _____ М. В. Коряковская

Протокол № _____ от « _____ » _____ 2015 г.

Составитель: Коряковская М. В. – преподаватель спец. дисциплин ГАПОУ СО «ННХТ» г. Новокуйбышевска

Эксперты:

Внутренняя экспертиза:

Техническая экспертиза: Ю. Н. Федотенкова – преподаватель спец. дисциплин ГАПОУ СО «ННХТ»

Содержательная экспертиза: О. Д. Щелкова – зам. директора по НМР ГАПОУ СО «ННХТ»

Содержание

Введение	2
Пояснительная записка	3
1. Техника и методика выполнения лабораторных работ	6
2. Состав и работа лабораторного стенда	9
3. Порядок проведения эксперимента	11
4. Лабораторные работы	
Лабораторная работа №1 «Исследование пластинчатого теплообменника»	13
Лабораторная работа №2 «Исследование теплообменника конструкции «труба в трубе»	21
Лабораторная работа №3 «Исследование теплообмена при течении теплоносителя в трубах»	31
Лабораторная работа №4 «Исследование водо - воздушных теплообменников»	44
Литература	53

Введение

Рабочая программа профессионального модуля ПМ.05 «Химическая технология органических веществ» является частью основной образовательной программы в соответствии с ФГОС по специальностям СПО 240113 Химическая технология органических веществ, включенного за счет вариативного объема часов и СПО 240134 Переработка нефти и газа.

В рамках программы профессионального модуля проводится подготовка специалиста, который выбирает оборудование, на котором следует осуществлять технологический процесс, участвует в проведении экспериментальных работ по освоению новых технологических процессов и внедрению их в производство в организационно-технических мероприятиях по своевременному освоению производственных мощностей. Сферой деятельности специалиста является разработка новых и совершенствование действующих технологических правил производства продукции.

С целью освоения профессионального модуля ПМ.05 студент должен уметь:

- устанавливать порядок выполнения работ и пооперационной маршрут обработки продукции;
- рассчитывать производственные мощности и загрузку оборудования;
- вносить изменения в техническую документацию в связи с корректировкой технологических процессов и режимов производства;
- осуществлять контроль за соблюдением технологической дисциплины в производстве и правильной эксплуатацией технологического оборудования;
- анализировать причины брака, принимать участие в разработке мероприятий по их предупреждению и устранению;
- правила техники электро- и пожаробезопасности при проведении всех видов работ.

Пояснительная записка

Принцип постоянной связи теории и практики получает непосредственное осуществление на лабораторных занятиях. Они активизируют познавательную деятельность студентов, так как требуют личного участия в проведении различного рода исследований. Студенты получают необходимые знания, навыки и умения.

При изучении профессионального модуля ПМ.05 обязательно проведение лабораторных работ. Рабочей программой предусмотрено выполнение 14-ти лабораторных работ. На каждую работу составлено задание: порядковый номер и название работы, её цель, оборудование, основные теоретические положения, порядок выполнения работы, задание в нескольких вариантах. Каждой лабораторной работе предшествует теоретическое занятие, на котором студентам необходимо изучить основные команды языка системы «MeasLAB».

Цели и задачи лабораторных работ:

Основная задача – закрепление и углубление теоретических знаний студентов.

Основная цель работ:

1. связать теорию с практикой – подтвердить теорию опытом;
2. привить навыки научно-исследовательской работы;
3. проверить уровень понимания вопросов, пройденных на уроках теоретического обучения.

В процессе выполнения лабораторных работ студент должен:

1. стремиться к самостоятельности в решении всех вопросов;
2. показать способность правильного применения теоретических положений;
3. организовывать свою работу так, чтобы с наименьшей затратой времени и труда найти наилучшее техническое решение.

При подготовке к лабораторным работам студент должен знать какую именно работу он будет выполнять, повторить теоретический материал, ознакомиться с описание работы и порядком её выполнения.

Лабораторные работы рассчитаны на 2 часа и за это время студент должен: получить допуск к работе, выполнить задание, оформить отчёт.

Контролем в лабораторном практикуме является защита отчётов по лабораторным работам.

Оформление отчета:

1. отчёт оформляется на листе формата А4 черной пастой;
2. переписать в отчёт номер, тему, наименование и цели работы;
3. изучить пояснение к работе;
4. выполнить задание, написать выводы;
5. сдать отчёт на проверку преподавателю.

Отчёт по лабораторным работам является техническим документом и оформляется в соответствии с ГОСТ 2,104-95 и 2,105-95 ЕСКД.

- Поясняющий текст и расчёты помещаются на одной стороне листа.
- Текст пишется аккуратно и разборчиво, сокращение слов не допускается.
- Каждый лист должен иметь рамку и основную надпись.
- При заполнении граф основной надписи указывается обозначение документа (ЛР – лабораторная работа), шифр специальности (240113, 240134), далее через точку номер группы, номер работы, год выполнения работы, тип работы (О – отчёт).

Например: ЛР 240113.111.1.14 О

- Рисунки и схемы должны выполняться карандашом с использованием чертёжных инструментов.

Отчёт должен содержать:

- Номер, тему и цель работы.

- Условия задачи по варианту, принятые обозначения переменных, логические функции для выходных и промежуточных переменных.
- Описание установки, все необходимые расчёты, графики, таблицы, рисунки.
- Выводы по работе.

1. Техника и методика выполнения лабораторных работ

Основные задачи лабораторного практикума:

- Определение коэффициентов теплоотдачи в рекуперативных теплообменниках при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителя.
- Изучение конструкции и принципов работы теплообменных аппаратов различного типа.
- Закрепление сведений о физической сущности переноса тепла от горячего теплоносителя к холодному и факторов, влияющих на оптимизацию этого процесса.

Порядок допуска к лабораторным работам:

К выполнению работы допускаются студенты, выполнившие в полном объеме задание для домашней подготовки к лабораторной работе, знающие правила техники безопасности.

Степень подготовленности к выполнению лабораторной работы проверяется преподавателем в беседе со студентами.

В случае недостаточной подготовленности к лабораторной работе студент не допускается к её выполнению.

Проведение лабораторной работы:

Лабораторные работы студенты выполняют единолично или бригадами, состав которых определяется преподавателем.

После получения разрешения на выполнение лабораторной работы студенты:

- Изучить методические указания, заготовить форму отчета о проведенной работе.
- Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера.
- Вызвать программу сбора и обработки для данных лабораторной работы (Пуск → Программы → MeasLAB).
- Подготовить установку к испытаниям теплообменников.

- Включить питание стенда кнопкой «Сеть»
- Провести необходимые работы и измерения.
- Результаты измерений и вычислений занести в таблицы.

Во время лабораторной работы запрещается покидать учебную лабораторию без разрешения преподавателя.

Работа считается выполненной, если студент:

- Предъявил преподавателю бланк отчёта с результатами работы.
- После разрешения преподавателя привёл в порядок рабочее место.

Если работа не закончена в предусмотренное расписанием время, то работа прекращается и подлежит повторению в назначенное преподавателем время.

При выполнении лабораторных работ предполагается индивидуализация обучения по принципу «каждому студенту (бригаде студентов) свой вариант задания». Поэтому в каждой лабораторной работе предусмотрено несколько вариантов индивидуальных заданий. По своему усмотрению преподаватель может упростить задачу варианта в зависимости от подготовки обучаемого.

Все лабораторные задания рассчитаны на 2 академических часа работы в лаборатории и 2 часа самостоятельной работы при домашней подготовке и оформлении отчёта по работе.

Правила техники безопасности:

- При эксплуатации и техническом обслуживании установки необходимо соблюдать требования ГОСТ 12.3.019-80, «Правил эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правил охраны труда при эксплуатации электроустановок потребителей».
- Любые подключения установки и работы по ее техническому обслуживанию производить только при отключенном питании и исполнительных механизмов.
- Не допускается попадание влаги на контакты разъемов и внутренних элементов установки.

- Подключение, регулировка и техобслуживание прибора должно производиться только квалифицированными специалистами.

Категорически запрещено выполнять или продолжать работу на неисправном оборудовании (при появлении искрения, специфического запаха нагретой изоляции и т.д.)

2. Состав и работа лабораторного стенда

Установка ТОТ–ТВТ, для исследования теплопередачи при вынужденном течении жидкости в трубе при её охлаждении в условиях естественной конвекции (рис. 1), входит в состав автоматизированного лабораторного комплекса по теоретическим основам теплотехники и термодинамики и предназначена для испытания различных конструкций теплообменников. Она используется для проведения лабораторных занятий по курсу «Процессы и аппараты», в профессиональных учебных заведениях. Работа на установке выполняется с использованием компьютерной измерительной системы MeasLAB.

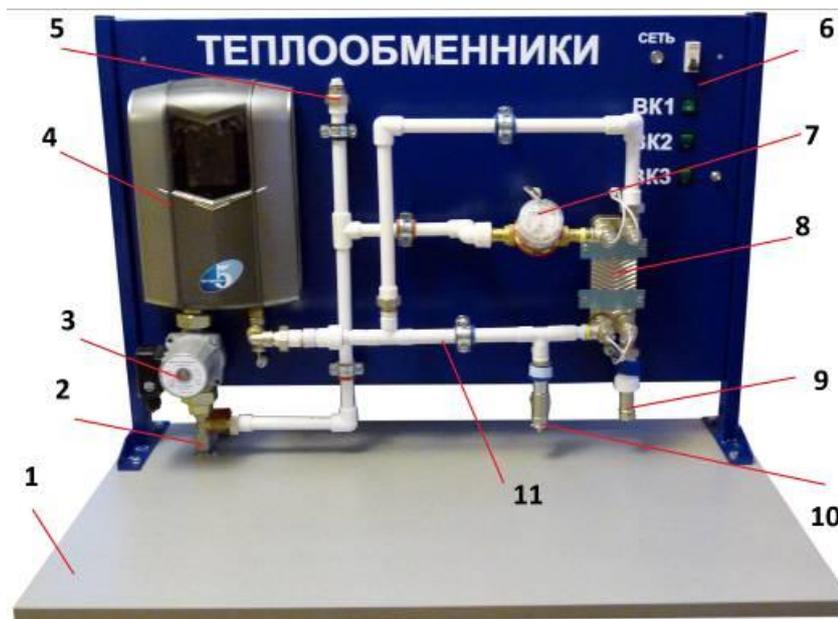


рис. 1



рис.2
заправочное
устройство

рис. 1 (фото лабораторной установки):

1 – основание стенда, 2 – узел слива горячего теплоносителя, 3 – насос горячего теплоносителя, 4 – нагреватель проточный, 5 – заливочный штуцер и клапан сброса воздуха, 6 - элементы управления стендом: автоматический выключатель, кнопки ВК1, ВК2, ВК3 (включение различных органов управления), 7 – импульсный счетчик расхода горячего теплоносителя, 8 – пластинчатый теплообменник, 9 – штуцер подключения насоса проточной подачи холодного теплоносителя, 10 - штуцер подключения насоса подачи холодного теплоносителя противотоком, 11 – теплообменник «труба в трубе».

Питание стенда, системного блока ПК и монитора или ноутбука осуществляется от сети 220В через свои шнуры питания. Для необходимых подключений стенда к компьютеру используются кабели USB.

Принцип работы стенда:

В лабораторной работе изучают процесс теплопередачи в рекуперативном теплообменном аппарате. Горячий теплоноситель под действием насоса движется по внутренней трубке размерами 3/8 дюйма. Холодный теплоноситель движется по кольцевому каналу межтрубного пространства теплообменного аппарата диаметром 7/8 дюйма. Движение горячего теплоносителя организовано всегда в одном направлении (слева направо). Движение холодного теплоносителя можно организовать в двух направлениях: — слева направо при прямотоке; — справа налево при противотоке. Объемные расходы горячего и холодного теплоносителей устанавливают с помощью счетчиков, расположенных на стенде. На каждой из этих панелей имеются 2 расходомера с диапазоном измерения до 20 м³/ч и 500 м³/ч. В теплообменном аппарате устанавливают температуру горячего теплоносителя до 60⁰С. При этом температуры на выходе из теплообменного аппарата горячего и холодного теплоносителей необходимо измерить.

Понятие оптимизации предполагает получение наилучших результатов в заданных условиях. Применительно к оптимизации теплообменных устройств в качестве технологических параметров системы рассматриваются:

- линейные скорости потоков в трубном и межтрубном пространствах;
- коэффициенты теплообмена;
- разность температур между рабочими средами;
- тепловая нагрузка теплообменного аппарата.

К параметрам технологических режимов относят - массовые расходы потоков, а также входные и выходные температуры потоков. В качестве варьируемых параметров рассматриваются - массовый расход холодного потока, конечные температуры потоков и количество теплоты, передаваемой в теплообменный аппарат.

3. Порядок проведения эксперимента

1. Распаковать лабораторную установку.
2. Разместить установку на лабораторном столе.
3. Извлечь из бака холодного теплоносителя все упаковочные материалы, извлечь заправочное устройство (рис. 2) и шланги слива.
4. Разместить бак холодного теплоносителя под столом.
5. Подключить насосы на крышке бака холодного теплоносителя к клеммам тумблера на задней панели и в процессе выполнения экспериментов определить направление движения теплоносителя.
6. Тумблер в крайних положениях запускает соответствующий насос, в среднем положении насосы выключены.
7. Подключить шланги бака холодного теплоносителя к штуцерам подвода холодного теплоносителя (9,10) плотно вставив шланги в разъем.
8. Заполнить бак холодного теплоносителя полностью, чтобы турбины насосов были погружены в жидкость.
9. Залить систему горячего теплоносителя дистиллированной водой. Большую часть воды рекомендуется залить через сливное отверстие 2, с помощью шланга и воронки, поднятых выше уровня магистрали счетчика. Уровень залитой воды должен быть выше магистрали счетчика, такой способ позволит избавиться от излишков воздуха при заливке. При этом клапан сброса воздуха должен быть выкручен.
10. Уровень воды поддерживать перед каждой лабораторной работой выше магистрали счетчика на 5-10 см. Теплоноситель следует подливать с помощью заливочного устройства (рис. 2).
11. Освободить от хомутов два шнура на задней панели (шнур 220В – белый провод, сигнальный шнур – черный провод).
12. Подключить сетевой шнур 220В к розетке. Заземление в розетке **ОБЯЗАТЕЛЬНО!**

13. Подключить сигнальный провод к соответствующему разъему на системе измерения.
14. Подключить блок питания насосов холодного теплоносителя в розетку на коробе на задней стороне панели.
15. Включите подачу питания стенда автоматическим выключателем.
16. Включить циркуляционный насос кнопкой ВК2.
17. Включить нагреватель кнопкой ВК1 с помощью продольных клавиш на нагревателе выставить темп нагрева самый минимальный (одно деление на шкале).
18. Если счетчик расхода теплоносителя не вращается, следовательно клапан нагревателя закрыт, для усиления давления в системе требуется выставить регулятор насоса горячего теплоносителя в режим 3.
19. Если дисплей нагревателя не загорается, требуется проконтролировать уровень воды в системе, он должен быть строго вышел магистрали счетчика. Перезапустить насос и нагреватель после доливки.
20. Режимы работы задавать строго по методическим указаниям.
21. Подключиться к измерительной системе по беспроводной связи.
22. Запустить программу проведения испытаний (Пуск → MeasLAB → «Испытания теплообменников»).
23. Все измерения проводить согласно методическим рекомендациям к лабораторной работе.
24. Ответить на контрольные вопросы и сделать самостоятельные выводы по выполненной работе.

Лабораторная работа 1. «Исследование пластинчатого теплообменника»

Цель работы: Изучение конструкции и принципов работы пластинчатых теплообменников.

Задачи работы:

1. Закрепление сведений о физической сущности переноса тепла от горячего теплоносителя к холодному и анализ факторов, влияющих на оптимизацию этого процесса.
2. Определение коэффициентов теплоотдачи в рекуперативных теплообменниках при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителя.

Основные сведения

Теплообменными аппаратами (теплообменниками) называются устройства, предназначенные для передачи тепла от одного теплоносителя к другому. По принципу действия теплообменные аппараты подразделяются на три вида: рекуперативные, регенеративные и смешительные.

В теплообменных аппаратах рекуперативного типа тепло передается от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку, которая называется поверхностью нагрева теплообменного аппарата.

Интенсивность работы теплообменного аппарата характеризуется количеством тепла, передаваемого через единицу поверхности нагрева в единицу времени. Эта величина зависит от физических свойств теплоносителей (вязкость, теплопроводность, плотность, теплоемкость), о режима их движения, от конструктивных особенностей аппарата (размеры, материал, состояние поверхности нагрева), от средней по поверхности нагрева разности температур между греющей и обогреваемой средой.

При расчете теплообменных аппаратов изменение температур теплоносителей при их движении по теплообменнику учитывается введением в расчетную формулу среднего логарифмического температурного напора Δt .

Влияние остальных факторов учитывают введением коэффициента теплопередачи k , который по физическому смыслу представляет собой количество тепла, передаваемого в единицу времени через единицу поверхности нагрева при разности температур между теплоносителями в один градус. Формула для расчета количества тепла, передаваемого в теплообменном аппарате за единицу времени, имеет вид:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t$$

Значение среднего логарифмического напора Δt зависит от начальных $t_{1н}$, $t_{2н}$ и конечных $t_{1к}$, $t_{2к}$ температур теплоносителей (t_1 – горячий теплоноситель, t_2 – холодный теплоноситель), а также от схемы включения теплообменного, т.е. от взаимных направлений движения теплоносителей.

Существует три основные схемы включения: прямоточная, противоточная и перекрестная, а также множество смешанных схем, получаемых в результате различных комбинаций основных схем (рис. 1).

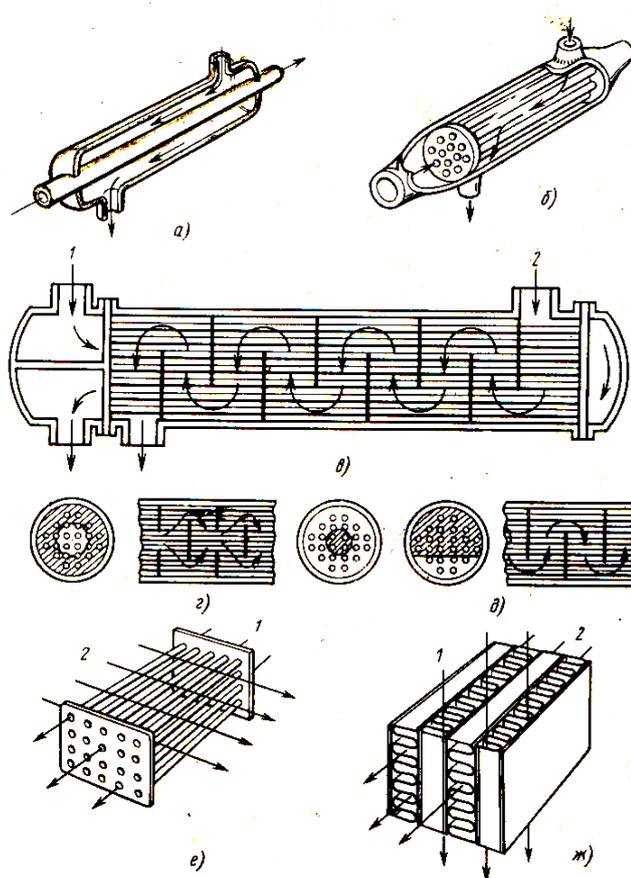


рис. 1 – Типичные конструктивные схемы рекуперативных теплообменных аппаратов

а – «труба в трубе» противоток; б – кожухотрубный противоток; в, г, д – кожухотрубный многократный перекрестный ток; е- трубчатый перекрестный ток; ж – пластинчато-ребристый перекрестный ток; 1- горячий поток; 2 – холодный поток

При прямоточной схеме движения горячий и холодный теплоносители движутся вдоль поверхности нагрева в одном направлении так, что на входе в аппарат тепло передается от горячего теплоносителя к холодному при относительно большой разности температур. На выходе из аппарата тепло передается от остывшего горячего теплоносителя к холодному при меньшей разности температур.

Противоточная схема (противоток). При этой схеме движения теплоносители 1 и 2 движутся вдоль поверхности нагрева в противоположных направлениях так, что входящий в аппарат горячий теплоноситель отдает тепло уже подогретому теплоносителю.

Коэффициент теплоотдачи k в теплообменных аппаратах определяют обычно по формулам для плоской стенки, т.к. трубки теплообменников имеют небольшую толщину по сравнению с их диаметром. Полученные формулы позволяют сравнить среднетемпературные напоры при различных схемах движения теплоносителей. Анализ их показывает, что при одинаковых температурах теплоносителей на входе и выходе их теплообменного аппарата, в противоточном теплообменнике температурный напор получается наибольшим. Благодаря большой величине температурного напора рабочая поверхность при противоточной схеме больше.

Для определения коэффициента теплопередачи требуется знать количество тепла, переданного за единицу времени в теплообменном аппарате, среднюю разность температур Δt между горячим и холодным теплоносителями и размер поверхности F . Количество тепла определяется по расходу теплоносителей, их теплоемкости и изменению их температуры в теплообменном аппарате. В идеальном аппарате, работающем без теплообмена с окружающей средой, количество тепла, отданное горячим теплоносителем Q_1 , должно равняться количеству тепла Q_2 , полученному холодным теплоносителем.

Описание лабораторной установки

Основными элементами лабораторной установки (рис. 2) являются пластинчатый теплообменник с движением горячего теплоносителя по внутреннему контуру и холодного теплоносителя по внешнему.

Для измерения температур теплоносителей служат температурные датчики, установленные на входе и выходе теплообменника. Направление потока горячего теплоносителя во всех экспериментах остается постоянным. В рассматриваемом аппарате он направлен слева направо. Минутный расход горячего теплоносителя для аппарата определяется по изменению показаний счетчика за заданный промежуток времени. Холодный теплоноситель может менять направление поочередным изменением переключателя работы насосов прямой и обратной подачи жидкости. За счет этого легко реализуются схемы прямотока и противотока для обоих теплообменников. Расход в системе холодного контура постоянный и равен 0,7 л/мин.

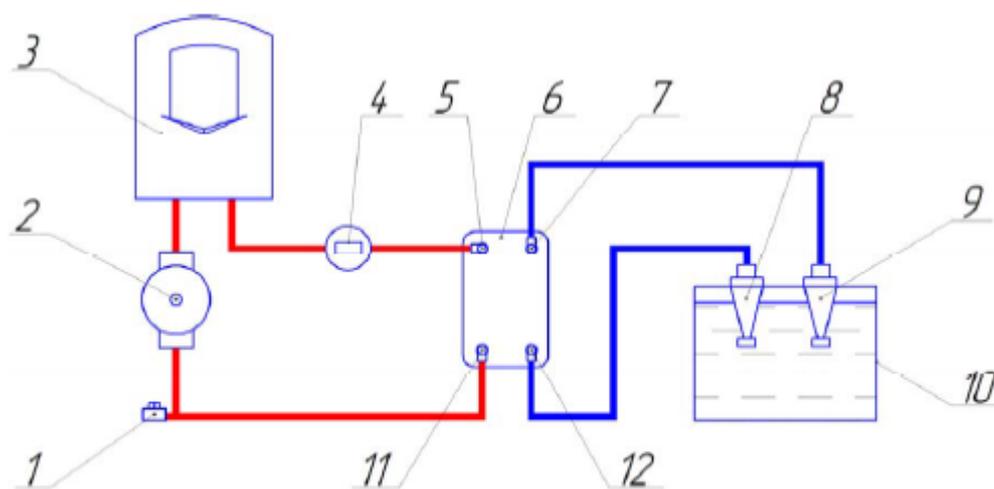


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки

1 – сливной кран горячего теплоносителя, 2 – циркуляционный насос подачи горячего теплоносителя, 3 – водонагреватель со ступенчатым управлением нагревом, 4 – счетчик расхода горячего теплоносителя с импульсным выходом, 5 – датчик температуры горячего теплоносителя на входе в теплообменник Т1, 6 – пластинчатый теплообменник, 7 – датчик температуры горячего теплоносителя, 7 – датчик температуры холодного теплоносителя Т3, 8 – насос подачи холодного теплоносителя противотоком, 9 – насос подачи холодного теплоносителя прямотоком, 10 – резервуар холодного теплоносителя, 11 – датчик температуры горячего теплоносителя на входе теплообменника Т2, 12 – датчик температуры холодного теплоносителя Т4.

Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания, заготовить форму отчета о проведенной работе, в которую внести название и цель работы, основные сведения об изучаемых процессах, схему экспериментальной установки, готовую таблицу 1 для записи результатов измерений и вычислений.
2. Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера.
3. Вызвать программу сбора и обработки данных лабораторной работы Пуск → MeasLAB → «Пластинчатый теплообменник»
4. На лицевой панели внесите название сохраняемого файла и запустите программу кнопкой «Пуск» (рис. 3).
5. Подготовить установку к испытаниям теплообменников. Удостовериться, что уровень воды наблюдается в заливочном устройстве и ниже его середины, в противном случае долить жидкость в систему.
6. Включить питание стенда кнопкой «Сеть»
7. Включить насос ВК2 и водонагреватель кнопкой «ВК1». Установить режим нагрева до 40-50⁰С.

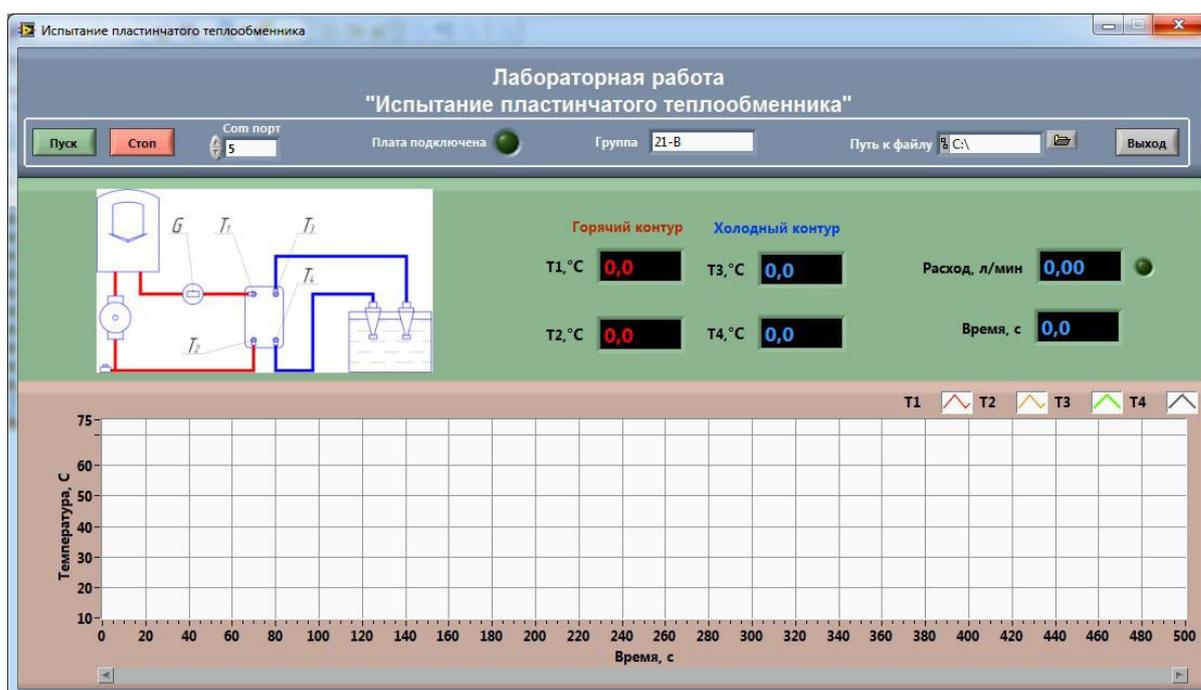


рис. 3 – Лицевая панель компьютерной системы измерения

8. После выхода на постоянный режим 40-50⁰С включить подачу холодного теплоносителя с помощью выключателя тумблера на панели управления стендом (положение вверх режим прямотока, положение вниз - противотока)

Обязательно! Делать перерыв насосам холодного контура после 15 мин работы на 5-7 мин.

9. При установлении стационарного теплового режима занести результаты измерений в табл. 1.

10. Изменить направление подачи холодного теплоносителя (положение тумблера вниз) и повторить эксперимент.

11. Вывести температуру нагревателя на новый уровень, но не более 70⁰С.

12. Повторить п.п. 8-10 для нового уровня температуры горячего теплоносителя.

13. Определить средний логарифмический температурный напор и коэффициент теплопередачи для испытанных теплообменников в режимах прямотока и противотока.

14. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.

Обработка данных

1. Площадь поверхности теплообмена для пластинчатого теплообменника равна 0,12 м² (см. руководство по теплообменнику).

2. Массовый расход горячей и холодной воды определяется по следующему соотношению

$$M_Z = G_Z \cdot \rho_Z \cdot M_Z = G_X \cdot \rho_X , \text{ (кг/с)}$$

где G_Z , G_X - расходы горячей и холодной воды (расход горячего теплоносителя определяется по расходомеру, холодного – методом проливки $\approx 0,7$ л/мин); ρ_Z , ρ_X - плотности горячей и холодной воды, вычисляются как функции средних температурных сред

$$\rho = f\left(\frac{t_n - t_k}{2}\right)$$

и выбираются по таблице 3.

3. Количество теплоты, отдаваемое горячим теплоносителем и полученное холодным:

$$Q_z = M_z \cdot c_z \cdot (t_{1n} - t_{1k}), (\text{кГ/с})$$

$$Q_x = M_x \cdot c_x \cdot (t_{2k} - t_{2n}), (\text{кГ/с})$$

где c_x, c_z - удельные теплоемкости горячей и холодной воды, определяются по таблице 4, (Дж/(кг·К));

t_{1n}, t_{1k} - начальная и конечная температура горячей воды, °С

t_{2n}, t_{2k} - начальная и конечная температура холодной воды, °С

4. Средняя разность температур (температурный напор) определяется по формуле:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_b - \Delta t_m}{2} \text{ при } \frac{\Delta t_b}{\Delta t_m} \leq 1,4$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_b - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_b}{\Delta t_m}\right)} \text{ при } \frac{\Delta t_b}{\Delta t_m} > 1,4$$

где $\Delta t_b, \Delta t_m$ - значения большего и меньшего температурных напоров в начале и конце поверхности теплообмена (определяются с учетом схемы включения), °С;

Для прямотока

$$\Delta t_b = t_{1n} - t_{2n}, \Delta t_m = t_{1k} - t_{2k}$$

Для противотока

$$\Delta t_b = t_{1n} - t_{2k}, \Delta t_m = t_{1k} - t_{2n}$$

Коэффициент теплопередачи для каждого режима определяется по формуле:

$$k = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{cp}}, \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}\right)$$

Таблица 1. Результаты измерений и вычислений при испытаниях пластинчатого теплообменника

Значения измеренных и вычисляемых параметров												
№№ п/п	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	Mг кг/с	Mх кг/с	Qг Вт	Qх Вт	Δtг °C	Δtх °C	Δtср °C	k Вт/(м²*К)
Прямоток												
1												
2												
3												
Противоток												
1												
2												
3												

Контрольные вопросы

1. Назовите преимущества и недостатки испытанных теплообменных аппаратов.
2. Что называется коэффициентом теплопередачи? Каков физический смысл единицы его измерения?
3. Какие факторы и параметры теплообменных аппаратов влияют на величину коэффициента теплопередачи?
4. В чем заключаются преимущества противоточной схемы по сравнению с прямоточной?
5. Может ли температура горячего теплоносителя на выходе из теплообменника быть меньше температуры холодного теплоносителя на выходе из теплообменника?
6. В каких случаях при расчете теплообменника можно пользоваться средним арифметическим температурным напором?
7. В каких технологических процессах используются теплообменные аппараты?

Лабораторная работа 2. «Исследование теплообменника конструкции «труба в трубе»

Цель работы: Изучение конструкции и принципов работы теплообменника конструкции типа «труба в трубе».

Задачи работы:

1. Закрепление сведений о физической сущности переноса тепла от горячего теплоносителя к холодному и анализ факторов, влияющих на оптимизацию этого процесса.
2. Определение коэффициентов теплоотдачи в рекуперативных теплообменниках при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителя.

Основные сведения

Теплообменными аппаратами (теплообменниками) называются устройства, предназначенные для передачи тепла от одного теплоносителя к другому. По принципу действия теплообменные аппараты подразделяются на три вида: рекуперативные, регенеративные и смешительные.

В теплообменных аппаратах рекуперативного типа тепло передается от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку, которая называется поверхностью нагрева теплообменного аппарата.

Интенсивность работы теплообменного аппарата характеризуется количеством тепла, передаваемого через единицу поверхности нагрева в единицу времени. Эта величина зависит от физических свойств теплоносителей (вязкость, теплопроводность, плотность, теплоемкость), о режима их движения, от конструктивных особенностей аппарата (размеры, материал, состояние поверхности нагрева), от средней по поверхности нагрева разности температур между греющей и обогреваемой средой.

При расчете теплообменных аппаратов изменение температур теплоносителей при их движении по теплообменнику учитывается введением в расчетную формулу среднего логарифмического температурного напора Δt . Влияние остальных факторов учитывают введением коэффициента

теплопередачи k , который по физическому смыслу представляет собой количество тепла, передаваемого в единицу времени через единицу поверхности нагрева при разности температур между теплоносителями в один градус. Формула для расчета количества тепла, передаваемого в теплообменном аппарате за единицу времени, имеет вид:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t$$

Значение среднего логарифмического напора Δt зависит от начальных $t_{1н}$, $t_{2н}$ и конечных $t_{1к}$, $t_{2к}$ температур теплоносителей (t_1 – горячий теплоноситель, t_2 – холодный теплоноситель), а также от схемы включения теплообменного, т.е. от взаимных направлений движения теплоносителей.

Существует три основные схемы включения: прямоточная, противоточная и перекрестная, а также множество смешанных схем, получаемых в результате различных комбинаций основных схем (рис. 1).

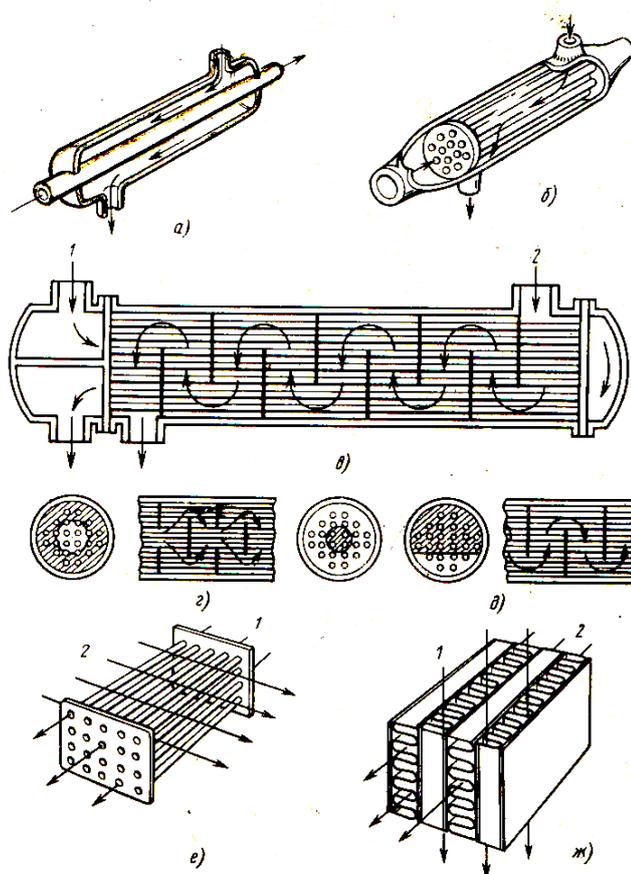


рис. 1 – Типичные конструктивные схемы рекуперативных теплообменных аппаратов

а – «труба в трубе» противоток; б – кожухотрубный противоток; в, г, д – кожухотрубный многократный перекрестный ток; е- трубчатый перекрестный ток; ж – пластинчато-ребристый перекрестный ток; 1- горячий поток; 2 – холодный поток

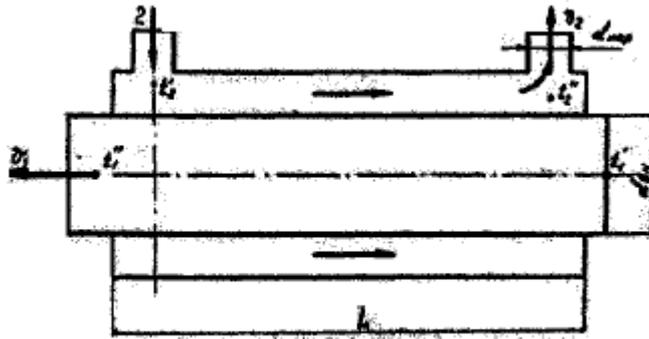


Рисунок 2 – Схема теплообменного аппарата «труба в трубе»

При прямоточной схеме движения горячий и холодный теплоносители движутся вдоль поверхности нагрева в одном направлении так, что на входе в аппарат тепло передается от горячего теплоносителя к холодному при относительно большой разности температур. На выходе из аппарата тепло передается от остывшего горячего теплоносителя к холодному при меньшей разности температур.

Противоточная схема (противоток). При этой схеме движения теплоносители 1 и 2 движутся вдоль поверхности нагрева в противоположных так, что входящий в аппарат горячий теплоноситель отдает тепло уже подогретому теплоносителю.

Коэффициент теплоотдачи k в теплообменных аппаратах определяют обычно по формулам для плоской стенки, т.к. трубки теплообменников имеют небольшую толщину по сравнению с их диаметром. Полученные формулы позволяют сравнить среднетемпературные напоры при различных схемах движения теплоносителей. Анализ их показывает, что при одинаковых температурах теплоносителей на входе и выходе их теплообменного аппарата, в противоточном теплообменнике температурный напор получается наибольшим. Благодаря большой величине температурного напора рабочая поверхность при противоточной схеме больше.

Для определения коэффициента теплопередачи требуется знать количество тепла, переданного за единицу времени в теплообменном аппарате, среднюю разность температур Δt между горячим и холодным

теплоносителями и размер поверхности F . Количество тепла определяется по расходу теплоносителей, их теплоемкости и изменению их температуры в теплообменном аппарате. В идеальном аппарате, работающем без теплообмена с окружающей средой, количество тепла, отданное горячим теплоносителем Q_1 , должно равняться количеству тепла Q_2 , полученному холодным теплоносителем.

Описание лабораторной установки

Основными элементами лабораторной установки (рис. 3) являются теплообменный аппарат типа «труба в трубе» с движением горячего теплоносителя по внутренней трубе и холодного теплоносителя по кольцевому пространству между внутренней и наружной трубами, и пластинчатый теплообменник.

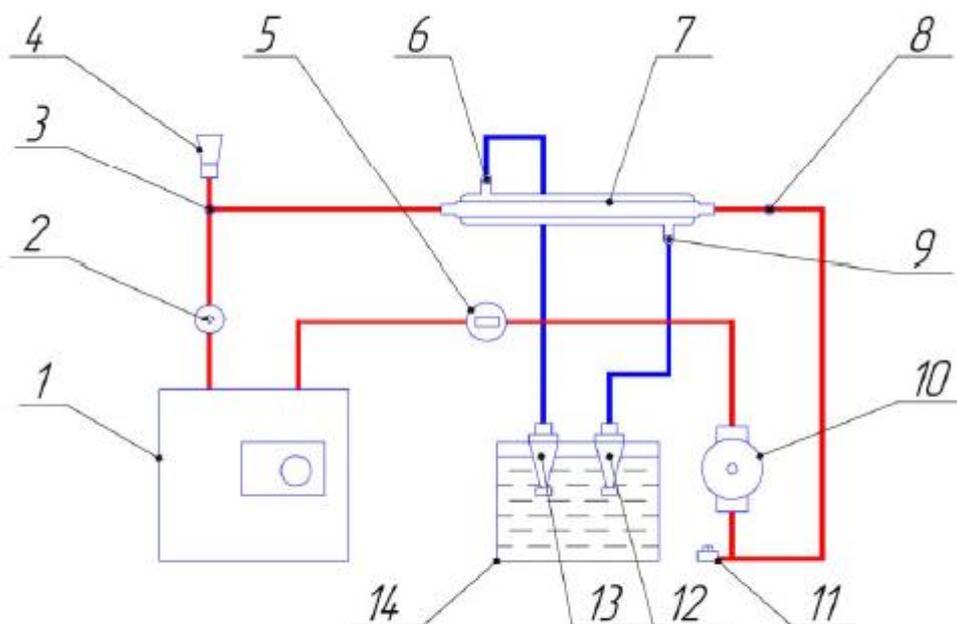


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

1 – водонагреватель со ступенчатым управлением нагревом, 2 – кран подачи горячего теплоносителя, 3 – термометр на входе в теплообменник Т1 горячего контура, 4 – заливочное устройство, 5 – счетчик расхода горячего теплоносителя с импульсным выходом, 6 – термометр холодного контура Т3, 7 – теплообменник «труба в трубе», 8 – термометр на выходе из теплообменника Т2 горячего контура, 9 – термометр холодного контура Т4, 10 – циркуляционный насос подачи горячего теплоносителя, 11 – сливной кран горячего теплоносителя, 12 – насос подачи холодного теплоносителя противотоком, 13 – насос подачи холодного теплоносителя прямотоком, 14 – резервуар холодного теплоносителя

Диаметр внутренней трубы теплообменника «труба в трубе» $d_{\text{вн}}=1/2$ дюйма, диаметр наружной трубы $d_{\text{нар}}=7/8$ дюйма. Длина рабочего участка, на котором происходит теплообмен $L=450$ мм.

Для измерения температур теплоносителей служат температурные датчики, установленные на входе и выходе внутренней и наружной труб. Направление потока горячего теплоносителя во всех экспериментах остается постоянным. В рассматриваемом аппарате он направлен слева направо. Минутный расход горячего теплоносителя для аппарата определяется по изменению показаний счетчика за заданный промежуток времени. Холодный теплоноситель может менять направление поочередным изменением переключателя работы насосов прямой и обратной подачи жидкости. За счет этого легко реализуются схемы прямотока и противотока для обоих теплообменников. Расход в системе холодного контура постоянный и равен 1,2 л/мин.

Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания, заготовить форму отчета о проведенной работе, в которую внести название и цель работы, основные сведения об изучаемых процессах, схему экспериментальной установки, готовую таблицу 1 для записи результатов измерений и вычислений.
2. Подготовить установку к испытаниям теплообменника. Удостовериться, что уровень воды наблюдается в заливочном устройстве и ниже его середины, в противном случае долить жидкость в систему. В системе не допускаются подтеки.
3. Подключить автоматизированный стенд к USB разъему компьютера и запустить программу Пуск → Программы → MeasLAB → «Испытание теплообменников».
4. Включить питание стенда кнопкой «Сеть».
5. Включить насос ВК2 и водонагреватель кнопкой ВК1. При этом установить режим малого нагрева.

6. На лицевой панели внесите название сохраняемого файла и запустите программу кнопкой «Пуск» (рис. 4).

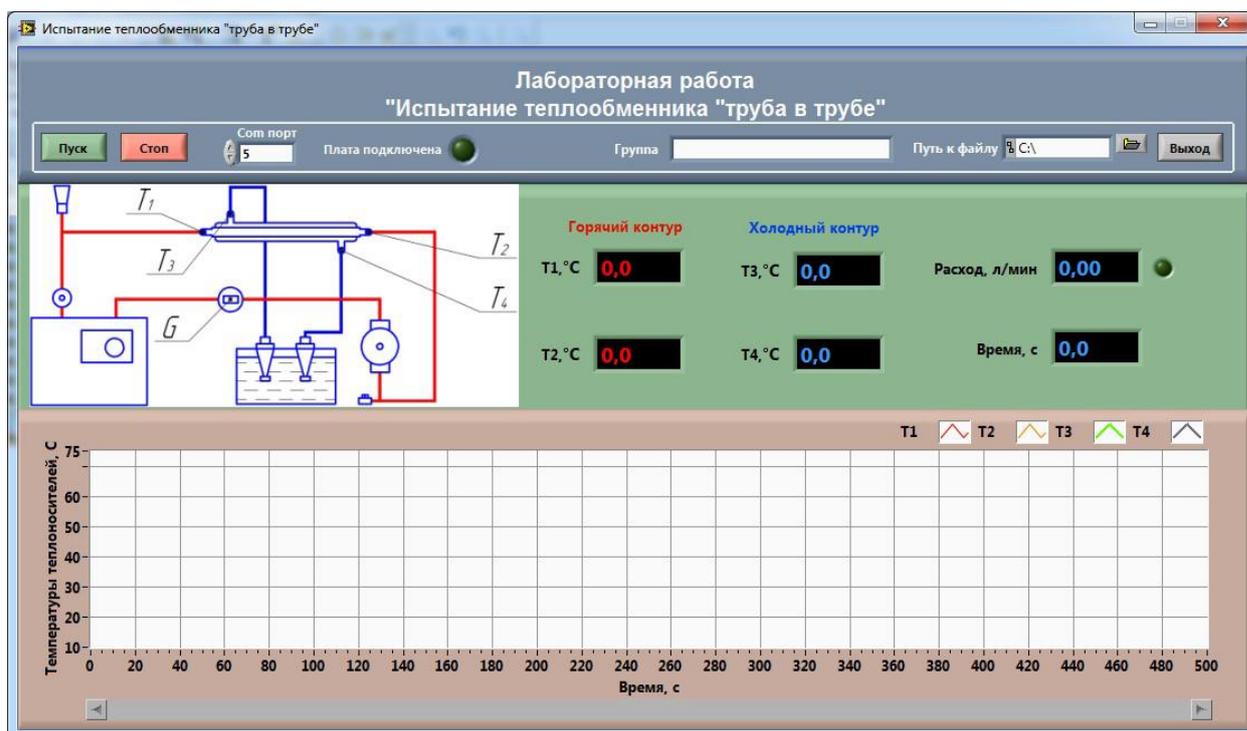


рис. 4 – Лицевая панель компьютерной системы измерения

7. После выхода на постоянный режим $40-50^{\circ}\text{C}$ включить подачу холодного теплоносителя с помощью выключателя тумблера на панели управления стендом (положение вверх режим прямотока, положение вниз - противотока)
8. При установлении стационарного теплового режима занести результаты измерений в табл. 1.
9. Через 10-15 минут изменить направление подачи холодного теплоносителя (положение тумблера вниз) и повторить эксперимент.
10. Вывести температуру нагревателя на новый уровень, но не более 70°C .
11. Повторить п.п. 8-10 для нового уровня температуры горячего теплоносителя.
12. Определить средний логарифмический температурный напор и коэффициент теплопередачи для теплообменника в режимах прямо- и противотока.
13. Результаты измерений и вычислений занести в таблицы 1.

Обработка данных

1. Площадь поверхности теплообменников «труба в трубе»:

$$f = \pi \cdot d_n \cdot l \text{ (м}^2\text{)}$$

где $d_n = 0,0222$ - наружный диаметр внутренней трубы теплообменника, м;

$l = 0.45$ – длина внутренней трубы, м

2. Массовый расход горячей и холодной воды определяется по следующему соотношению:

$$M_Z = G_Z \cdot \rho_Z \cdot M_Z = G_X \cdot \rho_X, \text{ (кг/с)}$$

где G_Z, G_X - расходы горячей и холодной воды (расход горячего теплоносителя определяется по расходомеру, холодного – методом проливки $\approx 1,2$ л/мин); ρ_Z, ρ_X - плотности горячей и холодной воды, вычисляются как функции средних температурных сред

$$\rho = f\left(\frac{t_n - t_k}{2}\right)$$

и выбираются по таблице 4.

3. Количество теплоты, отдаваемое горячим теплоносителем и полученное холодным:

$$Q_z = M_z \cdot c_z \cdot (t_{1n} - t_{1k}), \text{ (кВт/с)}$$

$$Q_x = M_x \cdot c_x \cdot (t_{2k} - t_{2n}), \text{ (кВт/с)}$$

где c_x, c_z - удельные теплоемкости горячей и холодной воды, определяются по таблице 5, (Дж/(кг·К));

t_{1n}, t_{1k} - начальная и конечная температура горячей воды, °С

t_{2n}, t_{2k} - начальная и конечная температура холодной воды, °С

4. Средняя разность температур (температурный напор) определяется по формуле:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_g - \Delta t_m}{2} \text{ при } \frac{\Delta t_g}{\Delta t_m} \leq 1,4$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_g - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_g}{\Delta t_m}\right)} \text{ при } \frac{\Delta t_g}{\Delta t_m} > 1,4$$

где Δt_{δ} , $\Delta t_{\text{м}}$ - значения большего и меньшего температурных напоров в начале и конце поверхности теплообмена (определяются с учетом схемы включения), °C;

Для прямотока

$$\Delta t_{\delta} = t_{1\text{н}} - t_{2\text{н}}, \Delta t_{\text{м}} = t_{1\text{к}} - t_{2\text{к}}$$

Для противотока

$$\Delta t_{\delta} = t_{1\text{н}} - t_{2\text{к}}, \Delta t_{\text{м}} = t_{1\text{к}} - t_{2\text{н}}$$

5. Коэффициент теплопередачи для каждого режима определяется по формуле:

$$k = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{\text{cp}}}, \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right)$$

Таблица 1. Результаты измерений и вычислений при испытаниях пластинчатого теплообменника

Значения измеренных и вычисляемых параметров												
№№ п/п	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	Mг кг/с	Mх кг/с	Qг Вт	Qх Вт	Δtг °C	Δtх °C	Δtср °C	k Вт/(м²*К)
Прямоток												
1												
2												
3												
Противоток												
1												
2												
3												

Контрольные вопросы

1. Назовите преимущества и недостатки испытанных теплообменных аппаратов.
2. Что называется коэффициентом теплопередачи? Каков физический смысл единицы его измерения?
3. Какие факторы и параметры теплообменных аппаратов влияют на величину коэффициента теплопередачи?

4. В чем заключаются преимущества противоточной схемы по сравнению с прямоточной?
5. Может ли температура горячего теплоносителя на выходе из теплообменника быть меньше температуры холодного теплоносителя на выходе из теплообменника?
6. В каких случаях при расчете теплообменника можно пользоваться средним арифметическим температурным напором?
7. В каких технологических процессах используются теплообменные аппараты?

Таблица 4. Зависимость плотности воды от температуры

Температура в °С	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$	Температура в °С	$\rho, 10^3 \text{ кг/м}^3$
- 10	0,99815	17	0,99880
- 9	0,99843	18	0,99862
- 8	0,99869	19	0,99843
- 7	0,99892	20	0,99823
- 6	0,99912	21	0,99802
- 5	0,99930	22	0,99780
- 4	0,99945	23	0,99757
- 3	0,99958	24	0,99732
- 2	0,99970	25	0,99707
- 1	0,99979	26	0,99681
0	0,99987	27	0,99652
1	0,99993	28	0,99622
2	0,99997	29	0,99592
3	0,99999	30	0,99561
4	1,00000	31	0,99521
5	0,99999	32	0,99479
6	0,99997	33	0,99436
7	0,99993	34	0,99394
8	0,99988	35	0,99350
10	0,99973	40	0,99118
11	0,99963	50	0,98804
12	0,99952	60	0,98318
13	0,99940	70	0,97771
14	0,99927	80	0,97269
15	0,99913	90	0,96534
16	0,99897		

Таблица 5 – Зависимость теплоемкости воды от температуры

T, °С	0	10	20	40	60	80	100
c, Дж/(кг*К)	4218	4192	4182	4178	4184	4196	4216

Лабораторная работа 3. «Исследование теплообмена при течении теплоносителя в трубах»

Цель работы: изучение механизма теплоотдачи и установление критериев, определяющих теплообмен в трубах.

Задачи работы:

1. Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи при течении в трубах и внешней свободной конвекции
2. Сравнение интенсивности конвективного теплообмена тел при ламинарном и турбулентном движении окружающей среды.
3. Изучение особенностей конвективного теплообмена при поперечном обтекании пучка труб.

Основные сведения

В целом, конвективный перенос тепла, происходящий в движущихся средах, обусловлен совместным действием двух механизмов — собственно конвективным переносом контактирующей с телом среды и теплопроводности. Таким образом, он осуществляется перемещением текучей среды из области с одной температурой в другую температурную область и за счёт теплового движения микрочастиц в неизотермическом пограничном слое жидкости. Для неэлектропроводных сред интенсивность конвективного переноса обычно велика по сравнению с теплопроводностью, последняя при ламинарном течении играет заметную роль лишь для переноса тепла в направлении, поперечном течению среды.

Роль теплопроводности более значительна при движении жидких металлов. В этом случае теплопроводность существенно влияет и на перенос тепла в направлении движения жидкости. При турбулентном течении основную роль в процессе переноса тепла поперек потока играет пульсационное перемещение турбулентных вихрей поперек течения жидкости. Тем не менее, участие теплопроводности в процессах конвективного теплообмена приводит к тому, на эти процессы в целом

существенно влияют теплофизические свойства движущейся среды – ее вязкость, теплопроводность, теплоёмкость и плотность.

В связи с тем, что при конвективном теплообмене определяющую роль играет перенос массы, контактирующей с телом жидкости или газа, его интенсивность в значительной мере зависит от характера движения жидкости, то есть от ее скорости, распределения в потоке, режима движения (ламинарное течение или турбулентное). Если движение жидкости обусловлено действием некоторого внешнего побудителя (насоса, вентилятора, компрессора и т.п.), то такое движение называют вынужденным, а происходящий при этом процесс вынужденной конвекцией. Если движение среды вызвано лишь наличием в ней неоднородного поля температуры, то такое движение называют свободным, а процесс обмена теплом свободной или естественной конвекцией. В нашем случае рассматривается передача тепла от вынужденного потока движущейся в трубе нагретой жидкости в покоящейся в целом воздушной среде через наружную оребренную поверхность трубы. На практике встречаются и такие случаи, когда приходится учитывать как вынужденную, так и свободную конвекцию.

В технике теплообмен между двумя движущимися теплоносителями через разделяющую их твёрдую стенку называется теплопередачей. Обычно он включает в себя теплоотдачу три взаимосвязанных процесса:

- отдачу тепла от движущейся горячей жидкости к стенке,
- теплопроводность в стенке,
- теплоотдачу от стенки к более холодной подвижной среде.

Для теплового расчета теплообмена при течении воздуха в трубе используют:

а) уравнение теплового баланса:

$$Q_1 = Q_2 + Q_{\text{пот}},$$

которое в развернутом виде для однофазных теплоносителей без учета тепловых потерь ($Q_{\text{пот}} = 0$) принимает вид:

$$Q = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_1' - T_1'') = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_2'' - T_2')$$

б) уравнение теплопередачи:

$$Q = k \cdot \overline{\Delta T} \cdot F$$

В формулах (1)÷ (3):

Q_1 – количество теплоты, отдаваемое горячим теплоносителем в единицу времени, Вт;

Q_2 – количество теплоты, получаемое холодным теплоносителем в единицу времени, Вт;

$Q_{\text{пот}}$ – потери теплоты в окружающую среду, Вт;

G_1 и G_2 – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с;

c_{p1} и c_{p2} – массовые изобарные теплоемкости горячего и холодного теплоносителей, Дж/(кг·К);

T_1' и T_1'' – температуры горячего теплоносителя на каждом участке входе и выходе из теплообменника, °С;

T_2' и T_2'' – температуры холодного теплоносителя на каждом участке входа и выхода, °С;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

$\overline{\Delta T}$ – средняя разность температур между горячим и холодным теплоносителями (средний температурный напор), °С;

F – площадь поверхности теплообмена, м².

Расходы теплоносителей рассчитывают по уравнению неразрывности:

$$G = \rho \cdot \overline{w} \cdot f$$

где ρ – плотность теплоносителя, кг/м³;

\overline{w} – средняя скорость теплоносителя, м/с;

f – площадь поперечного сечения канала для прохода теплоносителя, м².

Площадь поперечного сечения канала рассчитывают по формулам:

— круглая одиночная труба с внутренним диаметром $d_{\text{вн}}$

$$f = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4} ;$$

— кольцевой канал теплообменника типа «труба в трубе»

$$f = \frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}}^2}{4},$$

где $D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр наружной трубы, м;

$d_{\text{нар}}$ – наружный диаметр внутренней трубы, м.

Плотность и удельную теплоемкость теплоносителя находят по справочным таблицам [2] при средней температуре теплоносителя:

$$T = \frac{T' + T''}{2},$$

где T' и T'' – температуры теплоносителя на входе и выходе из теплообменного аппарата, °С.

Уравнение теплового баланса для однофазных теплоносителей (2) можно записать в виде:

$$W_1 \cdot \delta T_1 = W_2 \cdot \delta T_2 \quad \text{или} \quad \delta T_2 / \delta T_1 = W_1 / W_2,$$

где $W_1 = G_1 \cdot c_{p1}$ и $W_2 = G_2 \cdot c_{p2}$ – расходные теплоемкости (эквиваленты) горячего и холодного теплоносителей, Вт/К; $\delta T_1 = T_1' - T_1''$ и $\delta T_2 = T_2'' - T_2'$ – изменение температур горячего и холодного теплоносителей в теплообменном аппарате, °С.

Температура теплоносителей вдоль поверхности теплообмена изменяется по экспоненциальному закону. При этом из соотношений (8) следует обратная пропорциональная зависимость между водяными эквивалентами и изменениями температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена (см. рис. 1 и рис. 2):

$$\begin{aligned} \text{если } W_1 > W_2, \text{ то } \delta T_1 < \delta T_2; \\ \text{если } W_1 < W_2, \text{ то } \delta T_1 > \delta T_2. \end{aligned}$$

При противоточной схеме движения теплоносителей (рис. 2) выпуклость кривых изменения температуры теплоносителей направлена в сторону большего водяного эквивалента, т.е. в сторону теплоносителя с меньшим изменением температуры.

Среднюю разность температур для прямоточной и противоточной схем движения теплоносителей рассчитывают по формулам:

$$\overline{\Delta T_a} = \frac{\Delta T_{\max} + \Delta T_{\min}}{2}, \text{ если } \Delta T_{\max} / \Delta T_{\min} \leq 2;$$

или

$$\overline{\Delta T_d} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}}, \text{ если } \Delta T_{\max} / \Delta T_{\min} > 2,$$

где ΔT_{\max} и ΔT_{\min} – максимальная и минимальная разности температур теплоносителей (см. рис.1 и рис.2), °С;

ΔT_a – среднеарифметическая разность температур, °С;

ΔT_d – среднелогарифмическая разность температур, °С.

У теплообменного аппарата, установленного на лабораторном стенде, для внутренней трубы выполняется условие $d_{\text{нар}}/d_{\text{вн}} < 2$, поэтому коэффициент теплопередачи рассчитывают по формуле теплопередачи через плоскую стенку:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке, Вт/(м²·К); δ – толщина стенки, м; λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К); α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю, Вт/(м²·К).

Коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 рассчитывают по критериальным формулам для вынужденного движения флюида в трубах и каналах [1]. При движении жидкостей и газов в трубах и каналах форма критериального уравнения зависит от режима движения жидкости. В общем случае критериальное уравнение, имеет вид:

$$Nu = f(Gr, Re, Pr \dots),$$

где Nu, Gr, Re, Pr – критерии подобия.

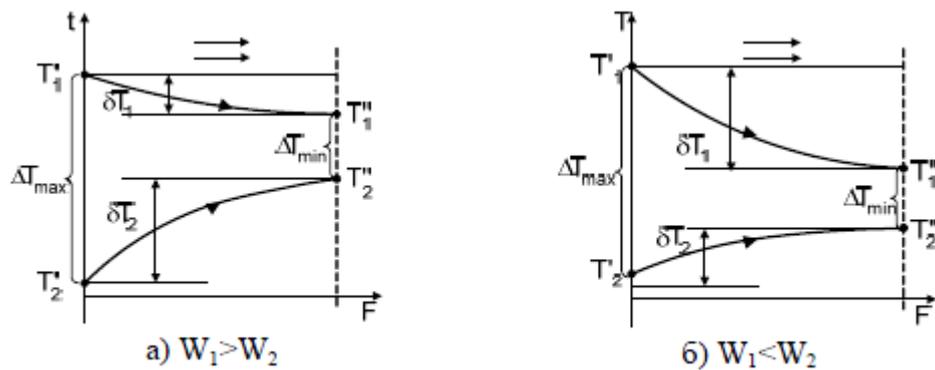


рис. 1 – Изменение температур горячего и холодного теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при прямоточной схеме движения в зависимости от соотношения их водяных эквивалентов

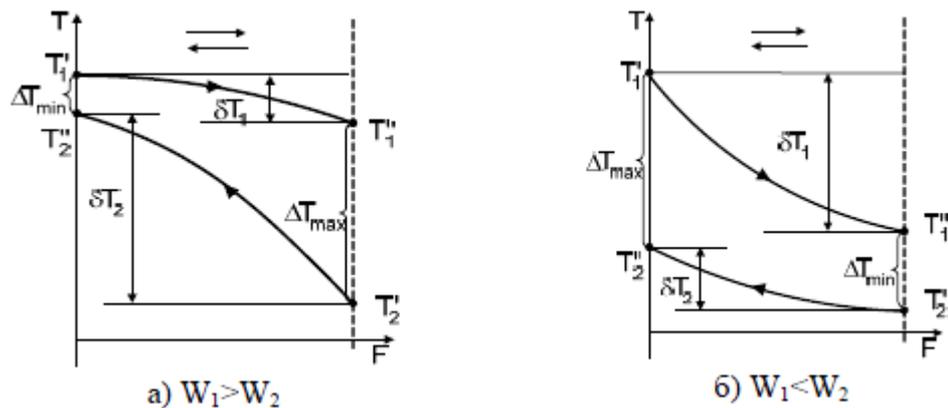


Рисунок 2 – Изменение температуры горячего и холодного теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при противоточной схеме движения в зависимости от соотношения их водяных эквивалентов

Критерий Нюссельта

$$Nu = \frac{\alpha \cdot R_0}{\lambda}$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

R_0 – определяющий (характерный) размер, м;

λ – коэффициент теплопроводности текучей среды, Вт/(м·К).

Критерий Грасгофа

$$Gr = \frac{g \cdot R_0^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta T$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

ν – кинематический коэффициент вязкости текучей среды, м²/с;

β – коэффициент объемного расширения флюида, 1/К;

ΔT – модуль разности температур между стенкой и флюидом, °С.

Коэффициент объемного расширения капельных жидкостей приведен в справочных таблицах [2] в зависимости от температуры флюида, а для газов его рассчитывают по формуле:

$$\beta = \frac{1}{T_0},$$

где T_0 – определяющая температура флюида, К.

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{w_0 \cdot R_0}{\nu},$$

где w_0 – определяющая (характерная) скорость, м/с; R_0 – определяющий (характерный) размер, м.

Критерий Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{a},$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости текучей среды, м²/с;

a – коэффициент температуропроводности флюида, м²/с.

При движении жидкостей и газов в трубах и каналах существуют ламинарный ($Re \leq 2300$), турбулентный ($Re \geq 10^4$) и переходный от ламинарного к турбулентному ($2300 < Re < 10^4$) режимы течения.

Средний коэффициент теплоотдачи при ламинарном вязкостно-гравитационном режиме течения ($Re \leq 2300$) может быть рассчитан по критериальному уравнению, полученному М. А. Михеевым:

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0,15 \cdot Re_{f,d}^{0,33} \cdot Pr_f^{0,33} \cdot (Gr_{f,d} \cdot Pr_f)^{0,1} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_y.$$

Поправочный коэффициент $\overline{\varepsilon}_y$, учитывающий влияние на теплоотдачу гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена, равен:

при $\ell/d < 50$ значение $\bar{\varepsilon}_t$ находят по данным табл. 1;

при $\ell/d \geq 50$ — $\bar{\varepsilon}_t = 1$.

Таблица 1 - Значение $\bar{\varepsilon}_t$ при вязкостно-гравитационном режиме течения флюида

ℓ/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$\bar{\varepsilon}_t$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0

Средний коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении флюида ($Re \geq 10^4$) в прямых гладких трубах рассчитывают по формуле М. А. Михеева:

$$\bar{Nu}_{f,d} = 0,021 \cdot Re_{f,d}^{0,8} \cdot Pr_{f,d}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_t$$

Поправочный коэффициент $\bar{\varepsilon}_t$, учитывающий влияние на теплоотдачу гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена, равен:

$$\begin{aligned} \text{при } \ell/d < 50 & \text{ — } \bar{\varepsilon}_t \approx 1 + 2d/\ell, \\ \text{при } \ell/d \geq 50 & \text{ — } \bar{\varepsilon}_t = 1. \end{aligned}$$

Переходный режим течения ($2300 < Re < 10^4$) характеризуется перемежаемостью ламинарного и турбулентного течений. В этом случае коэффициент теплоотдачи можно рассчитать по формуле:

$$\bar{Nu}_{f,d} = K_0 \cdot Pr_{f,d}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_t,$$

где комплекс K_0 зависит от числа Рейнольдса (табл. 2), а поправку $\bar{\varepsilon}_t$, рассчитывают так же, как и при турбулентном режиме течения.

Таблица 2
Зависимость комплекса K_0 от числа Рейнольдса

$Re \cdot 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
K_0	2,2	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Поправку ε_t в формулах (18), (19) и (20), учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле:

$$\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25},$$

где критерий Прандтля Pr_f принимают по справочным данным для текучей среды при средней температуре, а критерий Прандтля Pr_w принимают по справочным данным для текучей среды при температуре стенки.

Определяющие параметры для расчета критериев в формулах (18), (19) и (20):

— определяющая (характерная) температура – средняя температура воды в

трубе или кольцевом канале $T_0 = \bar{T}_r = 0,5 \cdot (T_f' + T_f'')$;

— определяющий (характерный) размер для внутренней трубы – внутренний

диаметр трубы $R_0 = d_{\text{вн}}$;

— определяющий (характерный) размер для кольцевого канала –

эквивалентный или гидравлический диаметр $R_0 = d_{\text{гид}} = D_{\text{вн}} - d_{\text{нар}}$;

— определяющая (характерная) скорость – средняя по сечению трубы

скорость движения $w_0 = G / (\rho \cdot f)$,

где T_f' и T_f'' – температура холодного и горячего теплоносителя на входе и выходе, °С;

$D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр наружной трубы, м;

$d_{\text{нар}}$ – наружный диаметр внутренней трубы, м.

Описание экспериментальной установки

Настоящая работа выполняется на лабораторном стенде. Во внутренний контур подается разогретый воздух с конвектора 1 (с регулятором температуры и измерителем расхода), во внешний холодный воздух с конвектора 2 (расход постоянный – по паспорту, нагрева не производится).

Для получения общей картины распределения температуры по всей длине трубы и сравнения средних и локальных значений коэффициентов теплопередачи, необходимые значения температур измеряются дополнительно зачеканенными термопарами.

Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания, заготовить форму отчета о проведенной работе, в которую внести название и цель работы, основные сведения об изучаемых процессах, схему экспериментальной установки, готовую таблицы 3, 4 и 5 для записи результатов измерений и вычислений.
2. Подготовить установку к испытаниям. Убедиться, что конвекторы установлены в каналы теплообмена.
3. Подключить стенд к сети 220 В.
4. Включить питание стенда кнопкой «Сеть».
5. Подключить измерительную систему к соответствующему разъему и запустить программу выполнения работы «Течение в трубах».
6. На лицевой панели внесите название сохраняемого файла и запустите программу кнопкой «Пуск» (рис. 3).
7. Насос конвектора 1 включается автоматически через ТРМ202.
8. Дождаться установления стационарного режима, поддерживаемого релейными регуляторами, встроенными в ТРМ202.
9. Снять показания термопар по холодному и горячему контуру и расхода (G). Результаты измерений записать в табл. 3.
10. Обработать полученные результаты

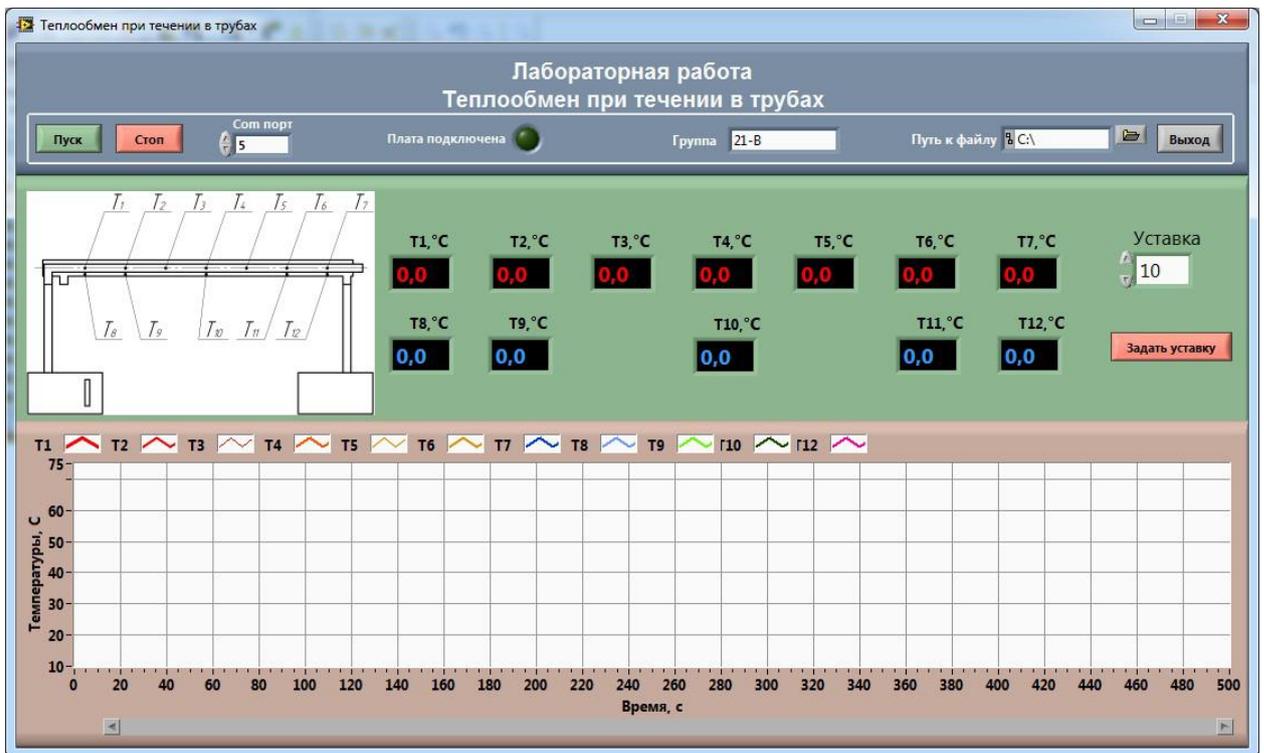


Рисунок 3 – Лицевая панель компьютерной системы измерения

Обработка результатов

1. Расход теплоносителя

$$G_1 = \rho_1 \cdot \dot{V}_1 ;$$

где ρ_1 – плотность горячего теплоносителя, определяемая по справочным данным при средней температуре горячего теплоносителя, кг/м³;

V_1 – скорость горячего теплоносителя, определяемая при средней температуре холодного теплоносителя, кг/м³.

2. Рассчитать среднюю температуру воздуха

$$t_{cp} = \frac{t_H - t_K}{2} .$$

3. Коэффициент теплопроводности жидкости (λ) и коэффициент кинематической вязкости (ν) определяются по средней температуре.

4. Рассчитываем критерий Рейнольдса и коэффициент Прандтля по формулам (4 и 5).

5. Рассчитываем критерий Нуссельта в соответствии с режимом течения жидкости по формулам (1 и 2).

6. Из формулы (3) определяем расчетный коэффициент теплоотдачи ($\alpha_{рас}$).

7. Определяем массовый расход $M = G \cdot \rho$,

плотность выбирать по таблице приложения при средней температуре.

8. Рассчитываем тепловой поток для каждой точки при различной теплоемкости

$$Q_i = M \cdot c_{vi} \cdot t_{cp}$$

9. Определяем температурный напор $\Delta t_i = t_i - t_{сред}$

где $t_{СРЕД}$ – температура воздуха

10. Определяем коэффициент теплоотдачи для каждой точки

$$\alpha_i = \frac{Q_i}{\pi \cdot d \cdot L(\Delta t_i)}$$

$$d_{ен} = 1/2'', d_{нар} = 7/8''.$$

11. Определяем экспериментальный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{экс} = \frac{\sum \alpha_i}{5}$$

12. Полученные результаты обработки данных записываем в табл. 4 и 5.

13. Сравнить полученные коэффициенты теплоотдачи. Проанализировать результаты. Сделать выводы.

14. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 3. Показания приборов

$G, \text{м}^3/\text{с}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	$t_k, ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$t_4, ^\circ\text{C}$	$t_5, ^\circ\text{C}$	$t_6, ^\circ\text{C}$	$t_7, ^\circ\text{C}$	$t_8, ^\circ\text{C}$	$t_9, ^\circ\text{C}$	$t_{10}, ^\circ\text{C}$	$t_{11}, ^\circ\text{C}$	$t_{12}, ^\circ\text{C}$

Таблица 4. Значения вычисленных параметров по критериям

$u, \text{м}/\text{с}$	$t_{cp}, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	Re	$a, \text{м}^2/\text{с}$	Pr	Nu	$\alpha_{рас}, \text{М}^3/\text{с}$

Таблица 5. Значения вычисленных экспериментальных параметров для пяти точек

№ точ.	c_p , Дж/кг·К	M , кг/с	Q , Дж/с	Δt_i , °С	α , м/с	$\alpha_{экс}$, м ³ /с
1						
2						
3						
4						
5						

Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл единицы измерения коэффициента теплоотдачи в СИ?
2. Какие дополнительные факторы и механизмы переноса тепла учитываются коэффициентом теплопередачи?
3. Используя аналогию тепловых и электрических явлений, сравните термические сопротивления движущихся слоев жидкости и воздуха с

сопротивлением $Rt = \frac{\delta}{\lambda}$ и оцените перепад температуры на толщине стенки трубы.

4. В чем проявляется энергосберегающий эффект систем отопления с принудительной циркуляцией на оребренных трубах?
5. Какими способами можно повысить коэффициент теплоотдачи жидкостей движущихся в трубах?
6. Самостоятельно проработайте вопрос о соотношениях коэффициентов теплоотдачи в пучках труб, омываемых потоком перпендикулярно их оси, (приложение 1).
7. Какому ряду труб соответствуют наибольшие значения коэффициентов теплоотдачи и чем это обусловлено?

Лабораторная работа 4. «Исследование водо - воздушных теплообменников»

Цель работы: Изучение конструкции и принципов работы водо-воздушных теплообменников.

Задачи работы:

1. Приобретение практических навыков расчетов параметров водо-воздушных теплообменных аппаратов.
2. Закрепление теоретических знаний о охлаждении рабочей жидкости при естественной и вынужденной конвекции.

Основные сведения

Теплообменными аппаратами (теплообменниками) называются устройства, предназначенные для передачи тепла от одного теплоносителя к другому. По принципу действия теплообменные аппараты подразделяются на три вида: рекуперативные, регенеративные и смешительные.

В теплообменных аппаратах рекуперативного типа тепло передается от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку, которая называется поверхностью нагрева теплообменного аппарата.

Интенсивность работы теплообменного аппарата характеризуется количеством тепла, передаваемого через единицу поверхности нагрева в единицу времени. Эта величина зависит от физических свойств теплоносителей (вязкость, теплопроводность, плотность, теплоемкость), от режима их движения, от конструктивных особенностей аппарата (размеры, материал, состояние поверхности нагрева), от средней по поверхности нагрева разности температур между греющей и обогреваемой средой.

При расчете теплообменных аппаратов изменение температур теплоносителей при их движении по теплообменнику учитывается введением в расчетную формулу среднего логарифмического температурного напора Δt . Влияние остальных факторов учитывают введением коэффициента теплопередачи k , который по физическому смыслу представляет собой

количество тепла, передаваемого в единицу времени через единицу поверхности нагрева при разности температур между теплоносителями в один градус. Формула для расчета количества тепла, передаваемого в теплообменном аппарате за единицу времени, имеет вид:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t$$

Значение среднего логарифмического напора Δt зависит от начальных $t_{1н}$, $t_{2н}$ и конечных $t_{1к}$, $t_{2к}$ температур теплоносителей (t_1 – горячий теплоноситель, t_2 – холодный теплоноситель), а также от схемы включения теплообменного, т.е. от взаимных направлений движения теплоносителей.

Существует три основные схемы включения: прямоточная, противоточная и перекрестная, а также множество смешанных схем, получаемых в результате различных комбинаций основных схем (рис. 1).

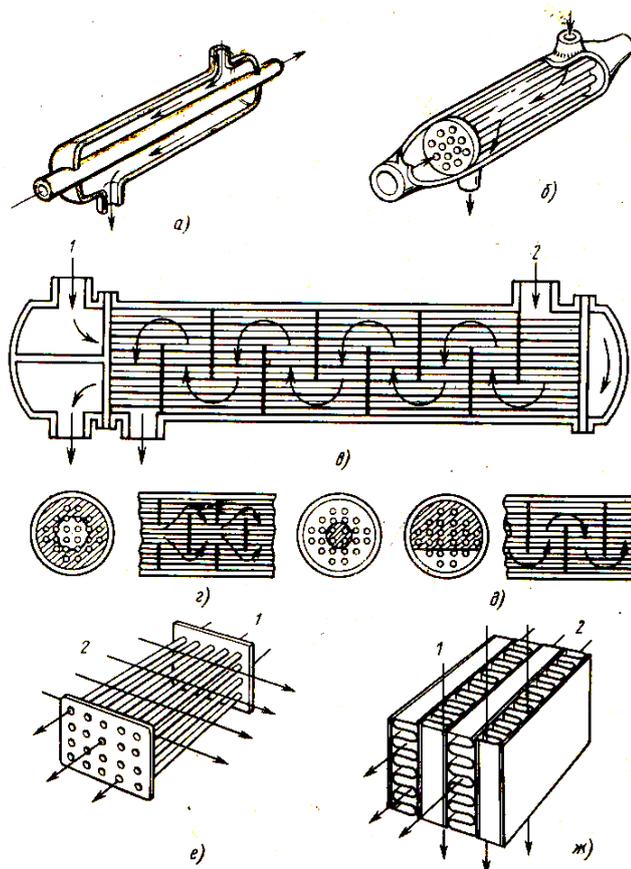


рис. 1 – Типичные конструктивные схемы рекуперативных теплообменных аппаратов

а – «труба в трубе» противоток; б – кожухотрубный противоток; в, г, д – кожухотрубный многократный перекрестный ток; е- трубчатый перекрестный ток; ж – пластинчато-ребристый перекрестный ток; 1- горячий поток; 2 – холодный поток

При прямоточной схеме движения горячий и холодный теплоносители движутся вдоль поверхности нагрева в одном направлении так, что на входе в аппарат тепло передается от горячего теплоносителя к холодному при относительно большой разности температур. На выходе из аппарата тепло передается от остывшего горячего теплоносителя к холодному при меньшей разности температур.

Противоточная схема (противоток). При этой схеме движения теплоносители 1 и 2 движутся вдоль поверхности нагрева в противоположных так, что входящий в аппарат горячий теплоноситель отдает тепло уже подогретому теплоносителю.

Коэффициент теплоотдачи k в теплообменных аппаратах определяют обычно по формулам для плоской стенки, т.к. трубки теплообменников имеют небольшую толщину по сравнению с их диаметром. Полученные формулы позволяют сравнить среднетемпературные напоры при различных схемах движения теплоносителей. Анализ их показывает, что при одинаковых температурах теплоносителей на входе и выходе их теплообменного аппарата, в противоточном теплообменнике температурный напор получается наибольшим. Благодаря большой величине температурного напора рабочая поверхность при противоточной схеме больше.

Для определения коэффициента теплопередачи требуется знать количество тепла, переданного за единицу времени в теплообменном аппарате, среднюю разность температур Δt между горячим и холодным теплоносителями и размер поверхности F . Количество тепла определяется по расходу теплоносителей, их теплоемкости и изменению их температуры в теплообменном аппарате. В идеальном аппарате, работающем без теплообмена с окружающей средой, количество тепла, отданное горячим теплоносителем Q_1 , должно равняться количеству тепла Q_2 , полученному холодным теплоносителем.

Описание лабораторной установки

Основными элементами лабораторной установки (рис. 2) являются теплообменный аппарат с естественной конвекцией и водо-воздушный теплообменник с вынужденной конвекцией.

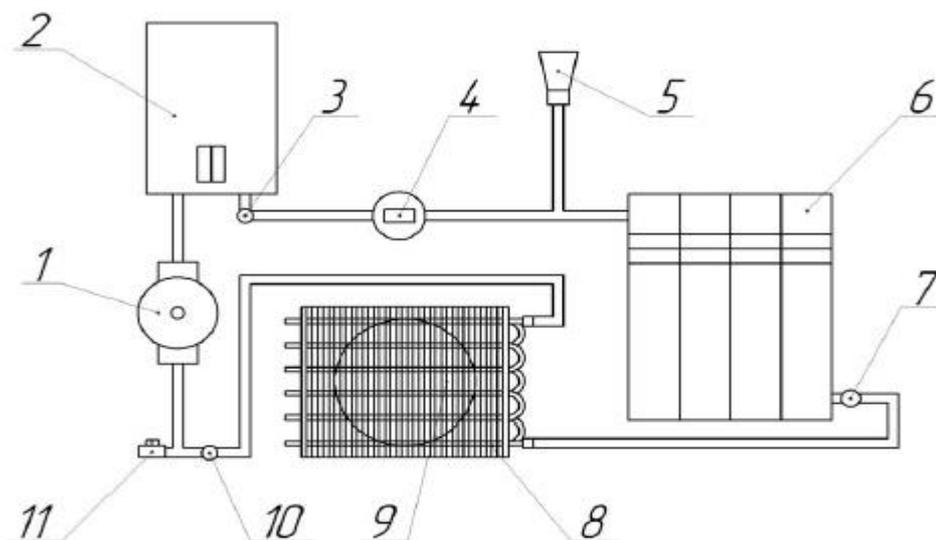


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки

1 – циркуляционный насос подачи горячего теплоносителя, 2 – водонагреватель со ступенчатым управлением нагревом, 3 – термомпара на входе в теплообменник с естественной конвекцией T1, 4 – счетчик расхода теплоносителя с импульсным выходом, 5 – заливочное устройство, 6 – теплообменник с естественной конвекцией, 7 – термомпара на выходе из теплообменника естественной конвекции и на входе в теплообменник с вынужденной конвекцией T2, 8 – теплообменник с вынужденной конвекцией, 9 – термомпара воздуха на выходе из теплообменника с вынужденной конвекцией T4, 10 – термомпара на выходе из теплообменника с вынужденной конвекцией T3, 11 – сливной кран горячего теплоносителя.

Для измерения температур теплоносителей служат температурные датчики, установленные на входе и выходе внутренней и наружной труб. Направление потока горячего теплоносителя во всех экспериментах остается постоянным. Минутный расход горячего теплоносителя для аппарата определяется по изменению показаний счетчика за заданный промежуток времени. При включении компьютерной системы измерения на цифровых индикаторах лицевой панели отображаются мгновенные значения температур, измеряемых всеми датчиками, и графики их изменения по времени.

Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания, заготовить форму отчета о проведенной работе, в которую внести название и цель работы, основные сведения об изучаемых процессах, схему экспериментальной установки, заготовить таблицу 1 и 2 для записи результатов измерений и вычислений.
2. Подготовить установку к испытаниям теплообменника. Удостовериться, что уровень воды наблюдается в заливочном устройстве и ниже его середины, в противном случае долить жидкость в систему. В системе не допускаются подтеки.
3. Подключить автоматизированный стенд к USB разьему компьютера.
4. Включить питание стенда кнопкой «Сеть 220В».
5. Запустить компьютерной системы измерения (Пуск>Mtfslab>Водовоздушный теплообменник)
6. На лицевой панели внесите название сохраняемого файла и запустите программу кнопкой «Пуск» (рис. 3).
7. Включить насос ВК2 и водонагреватель кнопкой ВК1.

Обязательно! Установить режим малого нагрева



рис. 3 – Лицевая панель компьютерной системы измерения

8. При установлении стационарного теплового режима занести результаты измерений температур ($t_{1к}$ – температура воздуха на выходе в водо-воздушного теплообменника с вынужденной конвекцией, $t_{2н}$ – температура воды на входе в водо-воздушного теплообменника с вынужденной конвекцией, $t_{2к}$ – температура воды на выходе в водо-воздушного теплообменника с вынужденной конвекцией) в таблицу 1.
9. $t_{1н}$ – температура воздуха на входе в водо-воздушного теплообменника с вынужденной конвекцией соответствует комнатной температуре.
10. Измените, расход насоса и повторите измерение.
11. Определить средний логарифмический температурный напор и коэффициент теплопередачи для теплообменника в режимах прямо- и противотока.
12. Результаты измерений и вычислений занести в таблицы 1.

Обработка данных

1. Необходимо определить основные геометрические параметры водо-воздушного теплообменника с вынужденной конвекцией. Записать результаты в таблицу 2.
2. Площадь поверхности водо-воздушного теплообменника с вынужденной конвекцией $F = 1 \text{ м}^2$
3. Массовый расход воздуха и воды определяется по следующему соотношению

$$M_{\text{воз}} = G_{\text{воз}} \cdot \rho_{\text{воз}}, \quad M_{\text{вод}} = G_{\text{вод}} \cdot \rho_{\text{вод}} \quad (\text{кг/с})$$

где $G_{\text{воз}} = 0,05$ - расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

$G_{\text{вод}}$ - расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\rho_{\text{воз}}, \rho_{\text{вод}}$ - плотности воздуха и воды, вычисляются как функции средних температурных сред

$$\rho = f\left(\frac{t_n + t_k}{2}\right)$$

и выбираются по таблице 4.

4. Тепловая нагрузка находится из уравнения теплового баланса

$$Q = M_{\text{вод}} \cdot c_{\text{вод}} \cdot (t_{2\text{н}} - t_{2\text{к}}), \text{ (Вт)}$$

$c_{\text{вод}}$ - удельные теплоемкости воздуха и воды, определяются по таблице 5 и 6, (Дж/(кг*К));

$t_{2\text{н}}, t_{2\text{к}}$ - начальная и конечная температура воды, °С

5. Средняя разность температур (температурный напор) определяется по формуле:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}}{2} \text{ при } \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} \leq 1,4$$

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)} \text{ при } \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} > 1,4$$

где $\Delta t_{\text{б}}$ и $\Delta t_{\text{м}}$ - значения большего и меньшего температурных напоров в начале и конце поверхности теплообмена, °С;

Определяются:

$$\Delta t_{\text{б}} = t_{1\text{н}} - t_{2\text{н}}, \Delta t_{\text{м}} = t_{1\text{к}} - t_{2\text{к}}$$

$t_{1\text{н}}, t_{1\text{к}}$ - начальная и конечная температура воздуха, °С

6. Коэффициент теплопередачи для каждого режима определяется по формуле:

$$k = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{\text{cp}}}, \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right)$$

Таблица 1. Результаты измерений и вычислений при испытаниях водо-воздушного теплообменника с вынужденной конвекцией.

№№ п/п	$G_{\text{вод}}$ °С	$t_{1\text{к}}$ °С	$t_{2\text{н}}$ °С	$t_{2\text{к}}$ °С	$M_{\text{воз}}$ кг/с	$M_{\text{вод}}$ кг/с	Q Вт	$\Delta t_{\text{б}}$ °С	$\Delta t_{\text{м}}$ °С	Δt_{cp} °С	k Вт/(м ² *К)
Прямоток											
1											
2											
3											
1											
2											
3											

Таблица 2. Результаты измерений и вычислений основных характеристик водо-воздушного теплообменника с вынужденной конвекцией

Названия характеристик	
Наружный диаметр трубок d_n , м	
Шаг трубок по фронту S_1 , м	
Шаг трубок по глубине S_2 , м	
Шаг ребер S_p , м	

Определение коэффициента теплопередачи радиатора

Коэффициентом теплопередачи принято называть плотность теплового потока, проходящего через стенку, разделяющую две среды, при разности температур сред. В отопительном приборе системы водяного отопления металлическая стенка разделяет воду, находящуюся с внутренней стороны и воздух – с наружной. Величина коэффициента теплопередачи зависит, главным образом, от условий теплоотдачи с внутренней и наружной стороны.

Коэффициент теплопередачи отопительного радиатора, определяется по формуле:

$$K_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + R_{ст} + \frac{1}{\alpha_2}} \left(\frac{Вт}{м^2 \cdot К} \right)$$

где α_1 и α_2 - коэффициенты теплоотдачи, соответственно на внутренней и наружной поверхности стенки, Вт/м²·К

$R_{ст}$ - термическое сопротивление стенки, зависящее от ее толщины и коэффициента теплопроводности материала. В отопительных приборах, выполненных из металла, при небольшой толщине стенки этот элемент существенного значения не имеет.

Количество теплоты, отдаваемой радиатором в окружающую среду,

определяется по зависимости
$$Q = k \cdot S \cdot (t_{ср} - t_{окр})$$

где Q - теплоотдача (тепло производительность, радиатора), Вт;

k - коэффициент теплопередачи радиатора, Вт/м²·К;

$t_{в}$ - температура окружающего воздуха, °С;

S - площадь наружной поверхности отопительного прибора, S = 0,285 (м²).

Средняя температура теплоносителя в отопительном приборе, определяемая как среднее значение температур теплоносителя на входе в прибор и на выходе из него

$$t_{cp} = \frac{t_{вх} + t_{вых}}{2}, (^\circ\text{C})$$

где $t_{вх}$ - температура теплоносителя на входе в прибор, $^\circ\text{C}$;

$t_{вых}$ - температура теплоносителя на выходе, $^\circ\text{C}$;

Величина S определяется произведением количества секций радиатора на площадь поверхности одной секции, которая в радиаторе лабораторной установки составляет $0,285 \text{ м}^2$.

Коэффициент теплопередачи радиатора водяного отопления, может быть определен с помощью уравнения (1)

$$k = \frac{Q}{S \cdot (t_{cp} - t_{окр})}$$

Тепло производительность радиатора вычисляется по формуле

$$Q = M_{вод} \cdot C_{вод} \cdot (t_{вх} - t_{вых})$$

Контрольные вопросы

1. Назовите преимущества и недостатки испытанных теплообменных аппаратов.
2. Что называется коэффициентом теплопередачи? Каков физический смысл единицы его измерения?
3. Какие факторы и параметры теплообменных аппаратов влияют на величину коэффициента теплопередачи?
4. В чем заключаются преимущества противоточной схемы по сравнению с прямоточной?
5. Может ли температура горячего теплоносителя на выходе из теплообменника быть меньше температуры холодного теплоносителя на выходе из теплообменника?
6. В каких случаях при расчете теплообменника можно пользоваться средним арифметическим температурным напором?

Литература

1. Исаченко, В.П. Теплопередача: учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – М.: Энерго-издат, 1981. – 416 с.
2. Краснощеков, Е.А. Задачник по теплопередаче: учеб. пособие для вузов / Е.А. Краснощеков, А.С. Суко-мел– М.: Энергия, 1980. – 288 с.
3. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию / Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский. Под редакцией Ю. И. Дытнерского, 2-е изд., перераб. и дополн. М.: Химия, 1991. – 496 с.
4. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. пособие для хим. - тех. спец. вузов: в 2 кн. Кн. 1. – М.: Химия, 1981. – 384 с.
5. Михеев М. А. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 319 с.