

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ**

**Часть II**

**Учебно-методическое пособие**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2015**

УДК 621.57:536.2

**Лабораторный практикум по теплопередаче. Ч. II: Учеб.-метод. пособие/** О.Б. Цветков, Ю.А. Лаптев, Ю.Н. Ширяев, В.В. Митропов, В.М. Азарсков, Г.Л. Пятаков, А.К. Ефременкова, Р.В. Ключева; Под ред. О.Б. Цветкова и Ю.А. Лаптева. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 57 с.

Приведены правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ на кафедре ТОТХТ; сведения о методах измерения и приборах, используемых при измерениях; содержание заданий на проведение лабораторных работ, краткие теоретические сведения, описание методик экспериментов и устройства стендов. Предложены алгоритмы выполнения работ, формы отчета и требования к защите студентом отчета по лабораторной работе.

Предназначено для бакалавров направлений 16.03.03, 14.03.01, 23.03.03, 19.03.02, 19.03.03, 19.03.01, 15.03.02, 15.03.04, 18.03.02, изучающих дисциплины Б.3.2.1, Б.3.1.12, Б.2.1.7, Б.3.1.8, Б.2.2.4, всех форм обучения.

**Рецензент: канд. техн. наук, проф. А.А. Малышев**

**Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 9 от 25.05.2015 г.**



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2015

© Коллектив авторов, 2015

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В лаборатории теплопередачи кафедры «Теоретические основы тепло- и хладотехники» студенты проводят лабораторные работы по определению коэффициентов теплопроводности, теплоотдачи и теплопередачи для различных видов теплообмена, в том числе теплообмена при изменении агрегатного состояния.

При выполнении экспериментов необходимо измерять значения температур, давлений, расхода сред, силу тока и напряжение. Принципы действия и устройство соответствующих измерительных приборов кратко изложены в начальных разделах пособия и рекомендованы для обсуждения на коллоквиумах, предшествующих лабораторным работам.

В приложениях приведены необходимые данные о теплофизических характеристиках веществ, исследуемых в ходе экспериментов.

Особенно напоминаем, что при выполнении каждой работы необходимо **строго** соблюдать указания преподавателей по правилам внутреннего распорядка и технике безопасности в лаборатории теплопередачи.

В пособии использован более чем полувековой методический опыт кафедры «Теоретические основы тепло- и хладотехники» Университета ИТМО, отражены результаты многолетней работы коллектива преподавателей и сотрудников и проведенной в последние годы коренной модернизации лаборатории.

Авторы благодарны инициаторам и участникам этих работ: А.Г. Ткачеву, Г.Н. Даниловой, Н.А. Бучко, С.Н. Богданову, В.Н. Филаткину, М.Г. Щербову, А.В. Куприяновой, И.К. Лебедкиной, Э.И. Гуйго, В.Б. Данину, В.М. Азарскову, В.К. Бельскому, С.Я. Фогель, нашим коллегам с кафедры ТОТ НИУ МЭИ и кафедры ТОТ НИУ СПбПУ Петра Великого за огромную помощь методическими материалами, заведующему кафедрой холодильных машин и низкопотенциальной энергетики Университета ИТМО профессору Малышеву А.А. за рецензию на пособие.

## **ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ СТУДЕНТАМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ В ЛАБОРАТОРИИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ КАФЕДРЫ ТОТХТ**

1. Перед выполнением лабораторных работ студент получает персональный допуск у преподавателя. Для этого студент должен изучить теоретические предпосылки метода измерений, устройство экспериментального стенда, порядок проведения опыта, правила техники безопасности, способ обработки полученных результатов, уметь оценить примерное значение результата опыта [1– 6].
2. Портфели, сумки, личные вещи рекомендуется сложить на отдельный стол при входе в помещение лаборатории, но не на лабораторном стенде. Приступать к выполнению работы можно только с разрешения преподавателя, соблюдая дисциплину и порядок. До окончания проведения работы студент должен находиться на своем рабочем месте.
3. Во избежание нарушения теплового режима установки при выполнении работ не разрешается открывать в лаборатории окна и устраивать сквозняки. В случае резких изменений показаний приборов студент немедленно сообщает об этом преподавателю или лаборанту.
4. После окончания работы протокол наблюдения подписывается преподавателем. Все лабораторные стенды остаются включенными, их выключить может только преподаватель или лаборант.

## **ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПРИ РАБОТЕ В УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ**

### **Общие правила**

Студенты, не сдавшие коллоквиум, к выполнению лабораторных работ не допускаются. Перед проведением работ каждый студент расписывается в журнале по технике безопасности.

Лабораторный стенд включает или выключает только преподаватель или лаборант. Запрещается оставлять работающую установку без присмотра.

Запрещается при работе на лабораторных стендах прикасаться к горячим поверхностям, трубопроводам, самим регулировать температуры термостатов.

В случае пожара студент немедленно покидает помещение лаборатории. Вызвать пожарную команду (телефон 01) можно, оказавшись вне зоны огня. Желательно если это возможно, обесточить лабораторные стенды и использовать для тушения углекислотные огнетушители.

### **Правила работы на установках, находящихся под избыточным давлением**

Студент должен внимательно следить за показаниями манометров, установленных на стенде, не допуская превышения давления, указанного в описании данной работы. Если давление выходит за пределы заданных показателей, необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или лаборанту и покинуть помещение.

### **Правила работы студентов на установках с электропитанием**

Недопустимо:

- включать и выключать силовые и осветительные рубильники в лаборатории;
- производить ремонт электрических систем;
- оставлять стенд, находящийся под напряжением, без присмотра;
- снимать и перевешивать предупреждающие и запрещающие плакаты;
- выключать блокировочные устройства;
- заходить и протягивать руки за ограждения стенда;
- снимать заземляющие провода и работать с незаземленным электрооборудованием;
- касаться незаземленных проводников, розеток, металлических клемм, обмоток трансформаторов и других деталей электрических схем, находящихся под напряжением.

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАВЛЕНИЯ, ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И РАСХОДА СРЕД

## Измерение температуры

В учебной лаборатории теплопередачи кафедры ТОТХТ используют стеклянные жидкостные термометры и термопары.

### 1. Стеклянные жидкостные термометры

Стеклянные жидкостные термометры получили широкое распространение в практике измерения температуры вследствие достаточно высокой точности и простоты измерений. Для заполнения термометров в зависимости от области их применения используют толуол, этиловый спирт и т. д.

Стеклянные жидкостные термометры в технике подразделяют на:

- термометры широкого применения без введения поправок к их показаниям;
- термометры повышенной точности, к показаниям которых вводятся поправки согласно свидетельству.

В основном изготавливают термометры двух типов: палочные и с вложенной шкалой. Термометры с вложенной шкалой более инерционны, но более удобны для наблюдений.

Лабораторные термометры снабжаются свидетельством, в котором указаны поправки к показаниям термометра на смещение нулевой точки, а также коэффициент внешнего давления в °С/мм рт. ст. (для введения поправки к показанию термометра при измерении внешнего атмосферного давления) и коэффициент внутреннего давления в °С/мм рт. ст. (для введения поправки к термометрам, измеряющим температуру в горизонтальном положении).

### 2. Термопары

Термопары применяются для измерения температур в широком диапазоне. Они обладают важным преимуществом дистанционного

измерения и не заменимы в случаях, когда требуется определить температуру в недоступных для человека местах.

Принцип действия термопары основан на термоэлектрическом эффекте, открытом немецким физиком Томасом Зебеком в 1821 году. В цепи, состоящей из нескольких разнородных проводников при наличии разности температур в местах их соединения возникает электродвижущая сила  $E$  (термоЭДС). Проводники образуют термоэлектрическую пару, а возникающая термоЭДС зависит только от свойств проводников и температур в местах их соединения. Проводники соединяют с помощью пайки или сварки, места соединения проводников называются «спаями». Если температуру одного из спаев поддерживать постоянной, то термоЭДС, развиваемая термопарой, будет зависеть только от температуры второго спая. Обычно спай, температура которого известна и поддерживается постоянной, условно называют «холодным», а второй спай, который помещают в то место, где измеряют температуру, условно называют «горячим».

Электродвижущая сила термопар  $E$  обычно составляет 40–70 мкВ при разности температур между спаями в 1 градус и может быть измерена цифровым или стрелочным гальванометром или милливольтметром.

В лабораторной практике и технике при измерении температур от –200 до 1000 и более градусов Цельсия применяют термопары, изготовленные из двух металлов или сплавов: например, медь – константан, железо – константан, хромель – алюмель, хромель – копель, платина – платинородий и др. Для уменьшения отвода теплоты по проводникам и снижения тепловой инерции термопар их изготавливают из проволок диаметром от 0,1 до 0,5 мм.

Термопары применяют как для измерения абсолютных значений температур, так и для измерения разности температур в каких-то двух точках установки. В последнем случае термопара называется дифференциальной.

При измерениях абсолютных значений температура холодного спая поддерживается постоянной и равной 0 °С. На практике холодный спай помещают в сосуд Дьюара с тающим льдом. Второй спай (горячий) помещают в то место, температуру которого измеряют. На рис. 1 приведена принципиальная схема медь–константановой абсолютной термопары, где температура  $t$  – измеряемая температура,  $t_0 = 0$  °С.

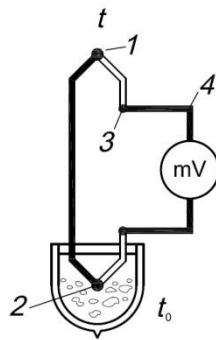


Рис. 1. Принципиальная схема абсолютной термопары  
 1 – горячий спай; 2 – холодный спай; 3 – соединительные про-  
 вода; 4 – милливольтметр

К проволоке из константана с двух концов припаивают соединительные провода – тонкие медные проволочки, идущие через переключатель к милливольтметру. Изготовленную таким образом термопару градуируют. Для этого меняют температуру горячего спая и измеряют зависимость возникшей термоЭДС данной термопары от температуры, т. е. получают функцию  $E = f(t)$ . Заметим еще раз, что при всех измерениях температура холодного спая поддерживается постоянной и равной  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Таким образом при градуировке зависимость  $E = f(t)$  может быть представлена в виде таблицы или графика, где по оси абсцисс откладывается известная по градуировке температура горячего спая, а по оси ординат – измеренная термоЭДС. После градуировки горячий спай термопары монтируют по месту в экспериментальную установку, используемую затем либо для измерения коэффициентов теплопроводности  $\lambda$ , либо коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$ . В ходе эксперимента возникшую в горячем спае термоЭДС фиксируют с помощью милливольтметра. Имея градуировочный график, находим точку пересечения измеренной термоЭДС с градуировочной кривой. От этой точки проводим вертикаль до оси абсцисс, где читаем абсолютное значение температуры горячего спая.

### Измерение давления

Для измерений давления используют барометры, манометры, вакуумметры, баровакуумметры и мановакуумметры. Все эти приборы делятся на две группы: жидкостные и пружинные.



В лаборатории кафедры ТОТХТ для измерения давления установлены пружинные приборы, которые используют упругую деформацию скрученной полый пружины (манометры и вакуумметры с трубкой Бурдона) или эластичную тонкую пластину – мембрану (барометр–анероид, манометры и вакуумметры пластинчатого или мембранного типа).

Основной частью трубчатого манометра является изогнутая пустотелая трубка овального сечения, так называемая трубка Бурдона 1 (рис. 2). Один конец трубки 1 закреплен в держателе 6, который снабжен штуцером 7 для соединения со средой, давление которой измеряется. Другой конец трубки 1 запаян и с помощью поводка 5 соединен с передаточным механизмом, состоящим из сектора 4 и зубчатого колеса 2 с закрепленной на его оси стрелкой 3. Шкала манометра градуируется по показаниям образцового прибора. Трубчатые манометры применяют для измерения давления до 500 МПа, а также используют для измерения разрежения (вакуума).

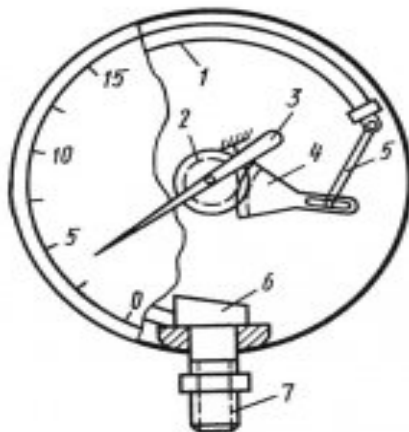


Рис. 2. Пружинный манометр:

- 1 – трубка Бурдона; 2 – зубчатое колесо; 3 – стрелка; 4 – сектор;  
5 – поводок; 6 – держатель; 7 – штуцер

Следует помнить, что пружинные манометры измеряют разницу между истинным давлением в установке  $p_{абс}$  и атмосферным давлением  $B$ , т. е. истинное давление среды в установке есть сумма

$$p_{абс} = p_{изб} + B,$$

где  $p_{изб}$  – показание манометра (избыточное давление), Па.

Атмосферное давление  $B$  измеряют мембранным барометром, установленным в лаборатории кафедры ТОТХТ.

### Методы определения тепловых потоков

Методы измерения тепловых потоков зависят от способа нагревания. При нагревании электрическим током тепловой поток  $Q$ , выделяемый нагревателем, вычисляется по закону Джоуля–Ленца

$$Q = IU = I^2 R.$$

В этом случае достаточно измерить силу тока  $I$  и падение напряжения  $U$  в цепи нагревателя, либо ток и электрическое сопротивление  $R$  нагревателя. Электрический ток измеряется амперметром, напряжение – вольтметром.

При нагревании (остывании) одной среды (жидкости или газа) потоком другой среды в теплообменном устройстве тепловой поток может быть рассчитан по изменению теплосодержания жидкости или газа

$$Q = MC_p \Delta T,$$

где  $M$  – массовый расход протекающей среды, кг/с;  $C_p$  – изобарная теплоемкость среды, Дж/(кг·К);  $\Delta T = T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}$  – изменение температуры протекающей среды (температурный напор), °С;  $T_{\text{вх}}$ ,  $T_{\text{вых}}$  – температуры среды на входе в теплообменник и на выходе из теплообменника соответственно, °С.

Теплоемкость находят из справочников и таблиц теплофизических свойств веществ и материалов (частично приведенных в приложениях настоящего пособия). Разность температур  $\Delta T$  измеряют термомпарами или термометрами, расход  $M$  – с помощью специальных устройств – расходомеров.

### Измерение расхода жидкостей

Под расходом понимают количество вещества, протекающего через определенное сечение канала в единицу времени. Расход выра-

жают в массовых (килограмм) или объемных (кубический метр) единицах, отнесенных к единице времени (секунда). Переход от массовых единиц ( $M$ ) к объемным ( $V$ ) и обратно производится по соотношению

$$M = \rho V,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости или газа,  $\text{кг/м}^3$ .

Приборы, с помощью которых измеряется расход вещества, называются расходомерами. Из расходомеров широкое распространение получили ротаметры.

Принцип действия ротаметра основан на зависимости перепада давлений в суживающемся устройстве от расхода жидкости. Ротаметр состоит (рис. 3) из стеклянной вертикальной конусной трубки 1, расширяющейся кверху. Внутри трубки помещается поплавок 2, свободно плавающий в потоке измеряемой среды. Жидкость подается в ротаметр снизу, а поплавок перемещается по трубке вверх.

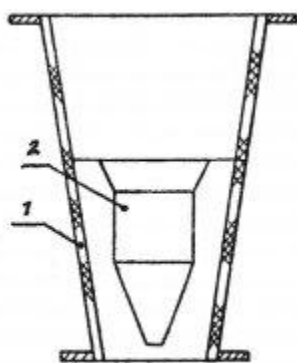


Рис. 3. Принципиальная схема ротаметра  
1 – стеклянная конусная трубка; 2 – поплавок

Высота зависания поплавка в трубке, а соответственно, и кольцевой зазор между поплавком и конусной трубкой будут тем больше, чем больше расход среды. При установившемся расходе достигается равновесие сил, действующих на поплавок: сила тяжести уравновешивается подъемной силой, инерционной силой (динамическим напором) и силой трения, т. е. имеет место равенство перепада давлений  $\Delta p$  до и после поплавка. Если пренебречь инерционной силой и силой трения, то расход будет однозначно связан с положением по-

плавка, и его можно вычислить по высоте зависания поплавка  $h$  в трубке. Зависимость между расходом и величиной  $h$  определяют градуировкой ротаметра по воде. В результате получают график зависимости расхода от положения поплавка в конусной трубке.

При использовании стеклянных ротаметров высоту зависания  $h$  определяют визуально по положению верхней кромки поплавка относительно шкалы, нанесенной непосредственно на внешнюю поверхность конусной трубки  $l$ . Основное преимущество стеклянных ротаметров – возможность измерения очень малых расходов (от  $0,04 \text{ м}^3/\text{час}$ ).

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ОТ НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ К ВОЗДУХУ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

#### Задание

На экспериментальном стенде произвести измерение величин, необходимых для расчета коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха около нагретой горизонтальной трубы. Сравнить вычисленное по опытным данным значение коэффициента теплоотдачи с рассчитанным по критериальному уравнению.

#### Теоретические предпосылки экспериментального метода

Опытное определение коэффициента теплоотдачи при конвективном теплообмене между поверхностью твердого тела и жидкостью или газом, омывающими эту поверхность, основывается на использовании закона Ньютона–Рихмана

$$Q_k = \alpha(t_{ст} - t_{ж})F, \quad (1)$$

где  $Q_k$  – конвективный тепловой поток, Вт;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – площадь теплоотдающей поверхности, м<sup>2</sup>;  $t_{ст}$  – температура поверхности твердого тела, °С;  $t_{ж}$  – температура жидкой или газообразной среды, °С.

На экспериментальном стенде для нагрева поверхности трубы используется электрический нагреватель. Тепловой поток от нагревателя определяется по формуле

$$Q = I \cdot U, \quad (2)$$

где  $I$  – сила тока, проходящего через нагреватель, А;  $U$  – напряжение на нагревателе, В.

При стационарном тепловом режиме тепловой поток передается от поверхности трубы к среде (в нашем случае – к воздуху) не только теплоотдачей, но и лучеиспусканием. Лучистый тепловой поток рассчитывается по уравнению Стефана-Больцмана

$$Q_{\text{л}} = c_0 \varepsilon_{\text{T}} \left[ \left( \frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{ж}}}{100} \right)^4 \right] F, \quad (3)$$

где:  $c_0$  – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, равный  $5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;  $\varepsilon_{\text{T}}$  – степень черноты поверхности твердого тела (принимается по справочным данным в зависимости от материала и состояния поверхности);  $T_{\text{ст}}$  – абсолютная температура поверхности трубы, К;  $T_{\text{ж}}$  – абсолютная температура воздуха, К;  $F$  – площадь поверхности трубы,  $\text{м}^2$ .

Конвективный тепловой поток определяется по формуле

$$Q_{\text{к}} = Q - Q_{\text{л}}. \quad (4)$$

Из сопоставления уравнений (1) – (4) следует, что для определения коэффициента теплоотдачи по опытным данным необходимо вычислить площадь теплоотдающей поверхности и измерить: температуры поверхности  $t_{\text{ст}}$  и окружающего воздуха  $t_{\text{ж}}$ , силу тока  $I$  и напряжение нагревателя  $U$ .

### Устройство экспериментальной установки

Внешний вид лабораторного стенда и его схема приводятся на рис. 4 и 5. Основная часть стенда – экспериментальная труба 1, наружный диаметр которой составляет 28 мм, длина 430 мм. На внутренней поверхности трубы укреплены спаи пяти термодпар:  $t_1, t_2, t_3, t_4$  и  $t_5$ . Термодпары расположены равномерно по длине трубы и находятся в верхних точках сечения трубы, как показано на рис. 5. Термодпара  $t_6$  находится в нижней точке сечения на середине трубы. Для измерения температуры воздуха вблизи трубы служит термодпара  $t_7$ .

Для уменьшения искажения температурного поля трубы из-за охлаждения торцов используются заглушки 2 из теплоизоляционного материала. Внутри трубы помещен электрический нагреватель 3, подключенный через образцовое сопротивление  $R_0 = 0,1 \text{ Ом}$  к источнику питания – лабораторному автотрансформатору 12. Падения напряжения на нагревателе  $U_{\text{н}}$  и на образцовом сопротивлении  $U_0$  измеряются вольтметром 5 с переключателем пределов измерений 6. Для

выравнивания температурного поля трубы нагреватель помещен в толстостенную медную трубку 11.

На передней панели станда расположены гнезда для подключения вольтметра и измеряемых напряжений  $U_n$  и  $U_o$ . Все термопары через переключатель 8 подключаются к измерителю температуры 7. Тумблер 9 служит для включения станда в сеть, включение нагревателя осуществляется тумблером 10. Установка необходимого напряжения на нагревателе и его регулирование производится ручкой 4 автотрансформатора 12.

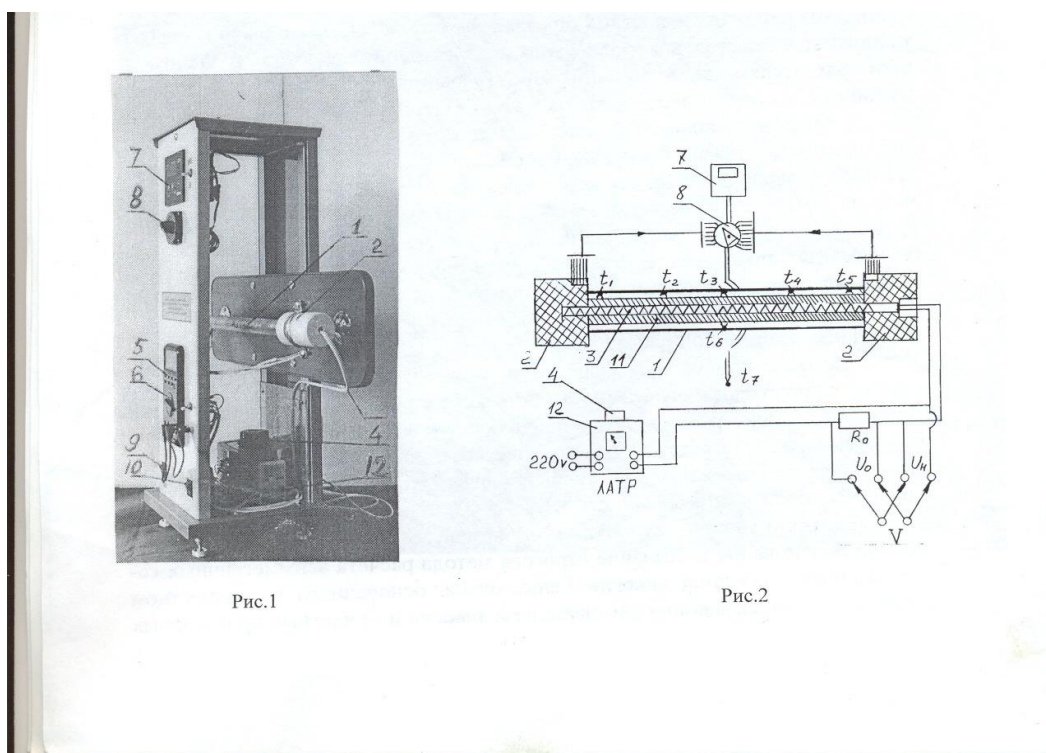


Рис. 4. Внешний вид и схема экспериментального станда для исследования теплоотдачи от наружной поверхности трубы к воздуху:

- а – внешний вид станда: 1 – экспериментальная труба; 2 – заглушки; 4 – ручка автотрансформатора; 5 – вольтметр; 6 – переключатель пределов измерений; 7 – измеритель температуры; 8 – переключатель термопар; 9, 10 – тумблеры; 12 – автотрансформатор;
- б – схема станда: 3 – нагреватель; 11 – медная трубка

## Выполнение работы

Перед началом измерений необходимо тщательно ознакомиться с устройством установки, сопоставив реальный опытный стенд с его изображением и схемой (рис. 4).

Для достижения стационарного режима, установка должна быть включена заранее, примерно за 1 час до эксперимента (выполняется лаборантом).

Поскольку уравнение Ньютона-Рихмана может быть использовано для расчета  $\alpha$  только при условии стационарного режима теплоотдачи от трубы к воздуху, необходимо убедиться в реализации такого режима на установке. О наличии стационарного режима теплообмена между трубой и воздухом судят по совпадениям в пределах погрешности измерения ЭДС термопар  $t_1-t_6$  через интервалы времени 5–6 минут. Температура наружного воздуха измеряется термопарой  $t_7$ . Как отмечалось выше, термопары поочередно подключаются к измерительному прибору переключателем 8.

После каждой серии измерений температур определяют падение напряжения на эталонной катушке  $U_0$  и на нагревателе  $U_n$ , переключая соответствующий тумблер. Проводят не менее 4–5 серий измерений.

Результаты измерения температур и напряжения заносятся в протокол наблюдений.

Таблица 1

### Протокол наблюдений

Время или № опыта	$t_1,$ °C	$t_2,$ °C	$t_3,$ °C	$t_4,$ °C	$t_5,$ °C	$t_6,$ °C	$t_7,$ °C	$U_0,$ мВ	$U_n,$ В
1									
2									
3									
4									



## Обработка результатов эксперимента

Определяют площадь поверхности трубы. Вычисляют средние значения температуры трубы и воздуха, напряжений на эталонной катушке и нагревателе. Рассчитывают силу тока, проходящего через нагреватель трубы. Определяют мощность нагревателя. По уравнению (3) рассчитывают мощность лучистого теплового потока. По формуле (4) определяют конвективный тепловой поток и, используя уравнение (1), вычисляют опытное значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{оп}}$ .

Расчетное значение коэффициента теплоотдачи находят, используя уравнение подобия для свободной конвекции около горизонтальной трубы

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,5\text{Ra}_{\text{ж}}^{0,25}. \quad (5)$$

Уравнение (5) справедливо для условий  $10^3 < \text{Ra} < 10^8$ .

Сначала по опытным данным, данным о геометрии стенда и табличным значениям теплофизических свойств воздуха вычисляют критерий Ra, убеждаются, что полученная величина лежит внутри указанного выше диапазона. Затем вычисляют критерий Нуссельта и определяют расчетное значение  $\alpha_{\text{р}}$ . Его необходимо сравнить с опытным значением  $\alpha_{\text{оп}}$ .

1. Сопоставление опытного значения коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha_{\text{экс}}$  с расчетным значением  $\alpha_{\text{расч}}$  проводится по формуле

$$\delta = \frac{\alpha_{\text{экс}} - \alpha_{\text{расч}}}{\alpha_{\text{расч}}} \cdot 100, \%. \quad (6)$$

## Отчет о лабораторной работе

Отчет по работе должен содержать следующие материалы:

1. Схему экспериментальной установки.
2. Характеристики опытной трубы.
3. Таблицу опытных данных.

4. Обработку экспериментальных данных, в том числе вычисление опытного и расчетного значений коэффициента теплоотдачи.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

#### Задание

Уяснить теоретические положения и методику определения степени черноты тонкой вольфрамовой проволоки, нагретой электрическим током.

Провести опыты по определению степени черноты методом нагретой нити.

Сопоставить полученное экспериментальное значение степени черноты вольфрамовой проволоки с табличными значениями, рекомендованными в справочной литературе [1–6].

#### Теоретические предпосылки экспериментального метода

Поток интегрального теплового излучения между телами, согласно закону Стефана-Больцмана, для абсолютно чёрного тела равен

$$E_0 = \sigma T^4 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (7)$$

где:  $T$  – абсолютная температура тела, К;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  – постоянная Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $C_0 = 5,67$  – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

При расчете потока излучения реальных тел  $E$  вводится коэффициент  $\varepsilon$ , называемый интегральной степенью черноты тела

$$E = \varepsilon \sigma T^4 = \varepsilon C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4. \quad (8)$$

Формула (8) справедлива для так называемых «серых» тел, для которых степень черноты считают не зависящей от длины волны.

Интегральная степень черноты показывает, во сколько раз энергия, излучаемая реальным телом во всем диапазоне теплового излучения, меньше энергии, излучаемой абсолютно чёрным телом при той же температуре.

Если тело 1 со степенью черноты  $\varepsilon_1$  находится в полости тела 2 со степенью черноты  $\varepsilon_2$ , а абсолютные температуры тел постоянны и равны  $T_1$  и  $T_2$  соответственно, то результирующий поток излучения

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{np} C_0 F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (9)$$

где:  $\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$  – приведенная степень черноты для систе-

мы тел 1 и 2.

Если поверхность тела 1  $F_1$  намного меньше поверхности тела 2  $F_2$  ( $F_1 \ll F_2$ ), то формула (9) принимает вид

$$Q_{1-2} \approx \varepsilon_1 C_0 F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (10)$$

т.е. результирующий поток излучения перестает зависеть от степени черноты тела 2, в полости которого находится тело 1. Другими словами, тело 2 ведет себя по отношению к телу 1 как абсолютно черное. Используя формулу (10), можно определить степень черноты в эксперименте. Исследуемое тело помещают в полость другого тела. Площадь поверхности полости должна быть значительно (на порядки) больше площади поверхности тела, степень черноты которого требуется определить. При этом точность расчета  $\varepsilon_1$  определяется точностью измерения потока  $Q_{1-2}$  и температур  $T_1$  и  $T_2$ .

## Устройство экспериментальной установки

Схема установки и передняя панель ее модуля представлены на рис. 5. Вольфрамовая проволока (нить) *1* имеет диаметр  $d_1 = 0,15$  мм и длину  $l = 550$  мм и омическое сопротивление (при  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ), равное  $3,5$  Ом. Нить *1* помещена в стеклянную трубку *2* внутренним диаметром  $d_2 = 9$  мм, откакумированную до давления около  $10^{-5}$  мм рт.ст.

Стеклянная трубка с нитью помещена в стеклянный баллон *3*. Между двойными стенками баллона *3* прокачивается вода. Хромель-копелевая термопара *4*, подключенная к измерителю температуры *5*, контролирует температуру воды. В пределах каждого режима эта температура остается постоянной.

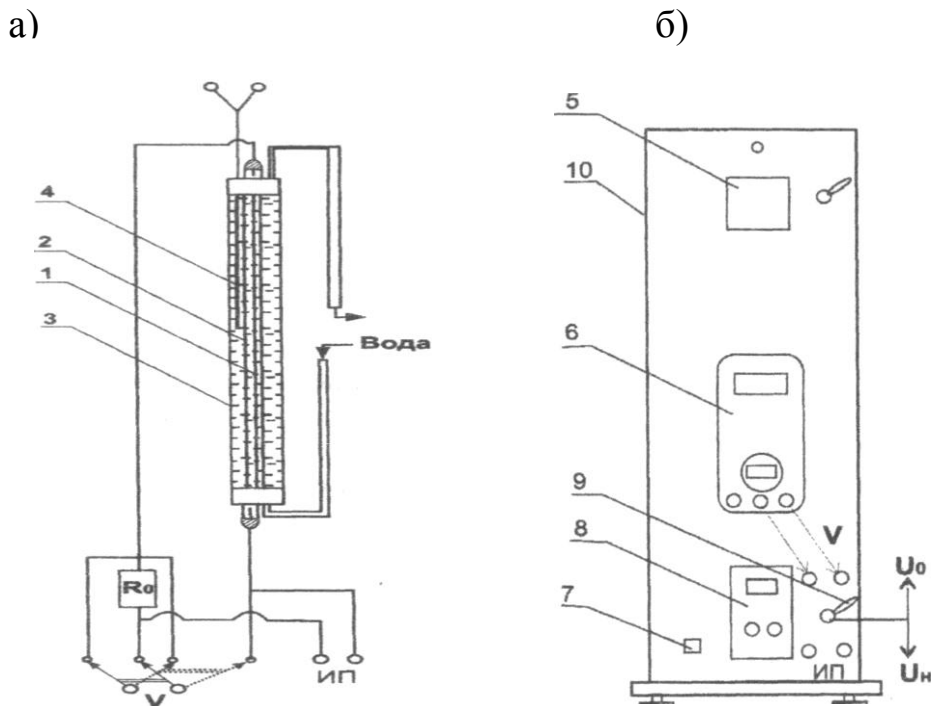


Рис. 5. Принципиальная схема лабораторной установки для определения степени черноты методом нагретой нити:  
*а* – принципиальная схема: *1* – вольфрамовая проволока; *2* – стеклянная трубка; *3* – баллон; *4* – хромель–копелевая термопара; *б* – передняя панель установки: *5* – измеритель температуры типа 2ТРМО; *6* – универсальный вольтметр типа МУ–67; *7, 9* – тумблеры; *8* – источник питания; *10* – измерительный блок

Баллон 3 укреплен в измерительном блоке 10, который находится на лабораторном столе. Электропитание к вольфрамовой проволоке 1 подводится от источника питания 8 через разъемы ИП. Последовательно с вольфрамовой проволокой включено образцовое сопротивление  $R_0 = 0,1$  Ом. Падение напряжения  $U_0$  на сопротивлении  $R_0$  определяет ток в цепи проволоки 1. Для измерения напряжения на вольфрамовой проволоке  $U_n$  и напряжении на образцовом сопротивлении  $U_0$  к разъемам  $V$  подключается универсальный вольтметр 6.

На передней панели (рис. 5, б) находится двухканальный измеритель температуры 5 типа 2ТРМО (к нему подключена хромель-копелевая термопара 4, используемая для измерения температуры воды). На панель выведены также: универсальный вольтметр 6 типа МУ-67 с автоматическим переключением пределов измерений, тумблер электропитания установки 7, разъем ИП, для подключения источника питания 8, разъемы  $V$  для подключения вольтметра 6. Здесь же расположен тумблер 9 для переключения вольтметра на измерение падения напряжения на образцовом сопротивлении ( $U_0$ ) и падения напряжения на вольфрамовой проволоке ( $U_n$ ).

### Выполнение работы

1. Записывают данные установки ( $d_1, d_2, d_3, l, R_0, R_{н0}, \alpha$ ).
2. Убеждаются, что все приборы выключены. Поворачивают регулятор напряжения на блоке питания против часовой стрелки до упора. Включают стенд тумблером 3. Включают источник питания 4, мультиметр 1 и измеритель температуры.
3. Определяют (по указанию преподавателя) напряжения, при которых проводят измерения. Рекомендуемый ряд напряжений: 6, 8, 10, 12, 16 вольт.
4. Переключают тумблер 5 в положение  $U_n$ . Устанавливают первое значение напряжения на нити, следя за показаниями мультиметра 1. Производят отсчет напряжения на нити  $U_n$ .
5. Переключают тумблер 5 в положение  $U_0$ . Производят отсчет напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$ .
6. Определяют температуру воды  $T_{ж}$  по показаниям измерителя температур 2.
7. Пункты 4 и 5 повторяют для других напряжений на нити.
8. Результаты заносят в табл. 2.

### Протокол наблюдений

Номер режима	$t_{ж},$ °С	$T_{ж},$ К	$U_0,$ мВ	$U_n,$ В
1				
2				
3				
4				

### Обработка результатов эксперимента

1. Температуру вольфрамовой проволоки определяют по формуле

$$T_1 = \frac{R_n - R_{n0}}{\alpha \cdot R_{n0}}, \quad (11)$$

где  $R_n$  и  $R_{n0}$  – сопротивление нити 1 при измеряемой температуре и при температуре  $0 \text{ } ^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$ , соответственно, Ом;  $\alpha = 4,1 \cdot 10^{-3}$  – температурный коэффициент сопротивления вольфрама, 1/К.

2. Температура наружной поверхности откакумированной трубки практически не отличается от температуры воды  $T_{ж}$ , а температуру внутренней поверхности можно рассчитать, используя уравнение теплопроводности для цилиндрической стенки:

$$T_2 = T_{ж} + \frac{Q_{1-2} \ln \frac{d_3}{d_2}}{2\pi\lambda_{ст}l}, \quad (12)$$

где  $\lambda_{ст} = 0,135 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  – теплопроводность стекла.

В стационарном тепловом режиме поток излучения равен тепловому потоку нити

$$Q_{1-2} = U_n \frac{U_0}{R_0}, \quad (13)$$

3. Степень черноты нити определим по формуле (4):

$$\varepsilon_1 = \frac{Q_{1-2}}{C_0 F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]} = \frac{U_n \frac{U_0}{R_0}}{C_0 \pi d_1 l \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}, \quad (14)$$

4. Результаты расчетов по формулам (11) – (14) для всех режимов заносим в табл. 3.

Таблица 3

Итоговая таблица

Номер режима	$R_n$ Ом	$Q_{1-2}$ Вт	$T_1$ К	$T_2$ К	$\varepsilon$
1					
2					
3					
4					

5. Студент строит график зависимости  $\varepsilon_1 = f(T_1)$  и делает выводы.

### Отчет о лабораторной работе

В отчете должны быть представлены:

1. Схема экспериментальной установки.
2. Характеристики измерительных приборов.
3. Протокол наблюдений, подписанный преподавателем.
4. Расчет опытного значения степени черноты и сопоставление его с табличными данными.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ

#### Задание

Изучив раздел «Теплообмен при кипении» учебной литературы [1, 2] студент должен:

1. Уяснить общие представления о процессе кипения, механизмах парообразования и теплообмена при пузырьковом кипении в большом объеме.

2. Освоить методику экспериментального исследования теплоотдачи при пузырьковом кипении.

3. Провести опыты по определению коэффициента теплоотдачи при кипении воды на поверхности обогреваемого медного цилиндра.

4. Сопоставить экспериментальное значение коэффициента теплоотдачи с расчетным значением, найденным по известным зависимостям для кипения в большом объеме.

#### Теоретические предпосылки экспериментального метода

Кипением называют процесс парообразования жидкости, нагретой выше температуры насыщения и характеризующийся возникновением новых свободных поверхностей раздела жидкой и паровой фаз. Кипение может происходить в большом объеме жидкости, либо внутри труб и каналов.

В лабораторной работе изучается процесс кипения воды при постоянном давлении на поверхности медного цилиндра в большом объеме в условиях свободной конвекции. Реализуется режим пузырькового кипения, когда пар образуется на поверхности нагрева в виде отдельных пузырьков.

Образование пузырьков на поверхности нагрева возможно лишь в том случае, когда окружающая пузырек жидкость будет перегрета, т. е. если ее температура  $t_{ж}$  будет превышать температуру насыщения (при заданном давлении жидкости  $p_n$ ) на некоторую величину  $\Delta t = t_{ж} - t_n$ , называемую температурным напором.



При увеличении температурного напора растет интенсивность процесса парообразования, а, следовательно, плотность теплового потока  $q$ , отводимого от твердой поверхности, и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ . Зависимость  $\alpha = f(\Delta t)$  называется кривой кипения (рис. 6).

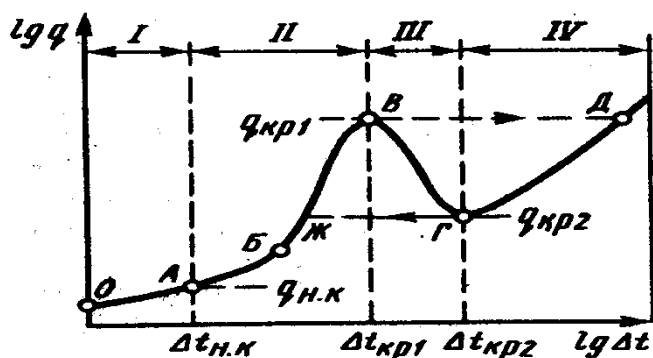


Рис. 6. Кривая кипения жидкости

I – свободная конвекция; II – пузырьковое кипение; III – переходный режим; IV – пленочное кипение

На участке  $OA$  имеет место свободная конвекция, на участке  $AB$  – неразвитое кипение, когда наблюдается одновременно и свободная конвекция, и процесс парообразования. Началу кипения (точка  $A$ ) соответствуют температурный напор  $\Delta t_{н.к}$  и плотность теплового потока  $q_{н.к}$ . На участке  $BB$  – развитое пузырьковое кипение, когда число паровых пузырьков резко возрастает, основное количество теплоты отводится в результате парообразования. При  $\Delta t = \Delta t_{кр1}$  (точка  $B$ ) плотность теплового потока достигает максимально возможной при пузырьковом кипении величины  $q_{кр1}$ . Эта величина называется первой критической плотностью теплового потока. Пройдя максимум в точке  $B$ , коэффициент теплоотдачи постепенно снижается по мере вытеснения пузырькового кипения пленочным. На переходном участке  $BГ$  сосуществуют пузырьковое и неустойчивое пленочное кипения. Величина  $q_{кр2}$ , соответствующая  $\Delta t_{кр2}$ , называется второй критической плотностью теплового потока. Далее на участке  $ГД$  возникает режим устойчивого пленочного кипения, когда все пузырьки пара слились в паровую пленку, отделившую поверхность нагрева, и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  резко падает.

Величина коэффициента теплоотдачи для области развитого пузырькового кипения определяется из соотношения

$$\alpha_{\text{расч}} = C f \Phi \bar{q}^n. \quad (15)$$

Для воды  $f(p) = p^{0,15}$ , где  $n = 0,70$ ;  $C = 3,0$ . Здесь  $p$  – бары,  $\alpha$  – Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $q$  – Вт/м<sup>2</sup>.

Тепловой поток определяется по мощности, потребляемой для нагрева поверхности медного цилиндра

$$Q = I \cdot \Delta U, \quad (16)$$

где  $I$  – сила тока, А;  $\Delta U$  – падение напряжения на нагревателе цилиндра.

Экспериментальное значение коэффициента теплоотдачи между стенкой медного цилиндра и кипящей водой  $\alpha$  определяется из соотношения

$$\alpha_{\text{экс}} = \frac{Q}{F \cdot \Delta t} = \frac{q}{\Delta t}, \quad (17)$$

где  $F$  – площадь поверхности цилиндра, м<sup>2</sup>;  $\Delta t = t_{\text{ст}} - t_{\text{н}}$ ,  $t_{\text{н}}$  – температура кипения воды при атмосферном давлении, °С;  $t_{\text{ст}}$  – температура поверхности медного цилиндра, которую считаем равной температуре перегретой жидкости  $t_{\text{ж}}$ .

### Устройство экспериментальной установки

Экспериментальная установка представлена на рис. 7. Стеклянная емкость с водой 8 (рис. 7, а) закрыта крышкой 9 со слоем теплоизоляции 14. Предварительный подогрев воды до 70–80 °С обеспечивает водоподогреватель 18, мощность ТЭНа которого устанавливается с помощью регулятора 10. В емкости 8 находится медный цилиндр 7 диаметром 30 мм и высотой 70 мм со встроенным нагревателем. Питание к нагревателю осуществляется от регулируемого трансформатора 12 по кабелю 11. Образцовое сопротивление 2 номиналом  $R_0 = 0,1$  Ом служит для определения тока в цепи нагревателя: о нем судят по падению напряжения на сопротивлении 2.

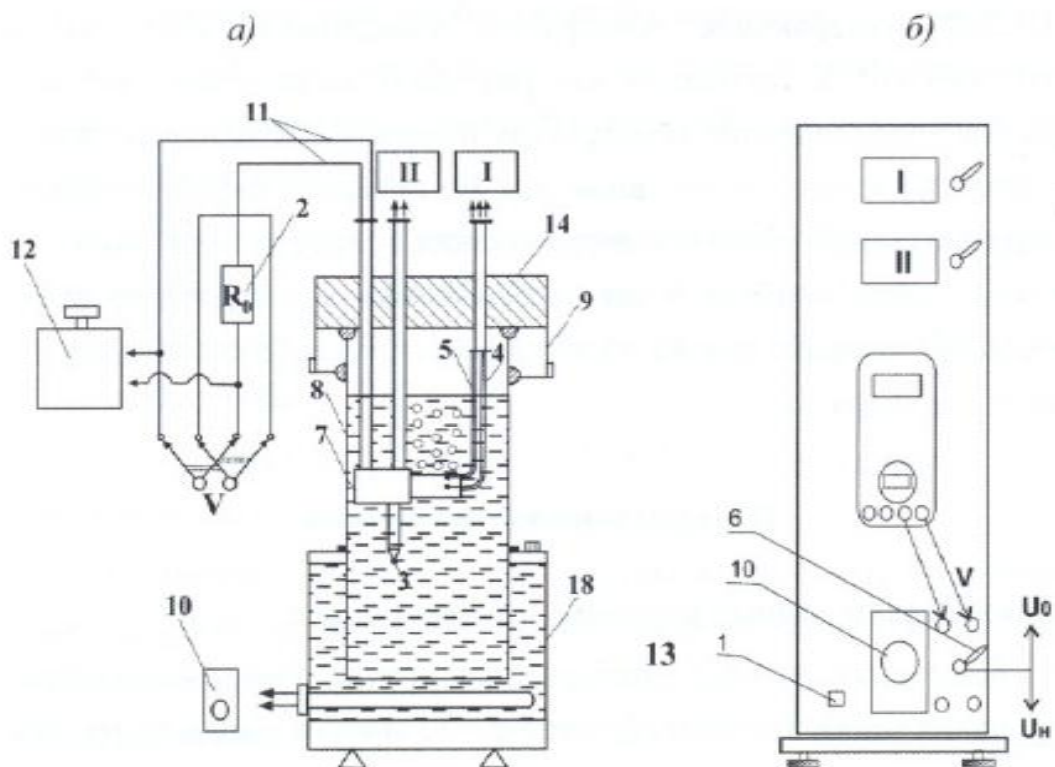


Рис. 7. Экспериментальная установка для исследования теплообмена при пузырьковом кипении жидкости:

- а – принципиальная схема; б – передняя панель стенда  
 1, 6 – тумблеры; 2 – образцовое сопротивление;  
 3, 4, 5 – термопары; 7 – медный цилиндр; 8 – емкость;  
 9 – крышка; 10 – регулятор; 11 – кабель; 12 – трансформатор;  
 13 (18) – водоподогреватель; 14 – теплоизоляция  
 I, II – измерители температуры

Термопара 3 контролирует температуру воды в емкости 8, термопара 5 установлена в верхней точке образующей цилиндра 7, а термопара 4 – посередине высоты цилиндра.

В верхней части передней панели (рис. 7, б) находятся два двухканальных измерителя температуры типа 2ТРМО. К одному из них (к измерителю I) подключена хромель-копелевая термопара 5 (рис. 7.а), измеряющая температуру поверхности цилиндра в верхней точке ( $t_1$ ). К другому (к измерителю II) подключены термопары 3 и 4, измеряющие температуру поверхности медного цилиндра 7 в нижней точке ( $t_2$ ) и температуру воды ( $t_ж$ ). На передней панели установки на-

ходятся также тумблер электропитания  $I$ , гнезда  $V$  для подключения вольтметра, тумблер  $б$  для переключения вольтметра на измерения падений напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$  и на нагревателе цилиндра  $U_H$ .

### Выполнение работы

1. Записывают данные об установке и условия проведения опыта.

2. Убеждаются, что все приборы выключены. Поворачивают регулятор напряжения автотрансформатора  $I2$  против часовой стрелки до упора. Подсоединяют к клеммам регулируемого выходного напряжения провода кабеля  $11$  согласно маркировке на задней панели. Через разъемы  $V$  подключают мультиметр. Включают трансформатор  $I2$  в сеть.

3. Тумблером  $I$  включают измерители температуры  $I$  и  $II$ .

4. Поворотом ручки по часовой стрелке примерно на половину оборота включают регулятор температуры водоподогревателя.

5. Через 30–40 минут вода в стеклянной емкости должна нагреться до 70–80 °С. Нагрев воды в стеклянной емкости  $8$  необходимо контролировать по показаниям измерителя температуры  $II$  (термопара  $3$ ).

6. Переключателем устанавливают мультиметр на измерение переменного напряжения. Переключают тумблер  $б$  на измерение  $U_H$  на нагревательном элементе.

7. Следя за показаниями мультиметра, устанавливают выходное напряжение трансформатора  $I2$  на уровне 180 В.

8. Регулируя (при необходимости) выходное напряжение трансформатора  $I2$ , выводят установку на режим пузырькового кипения. Режим наблюдают визуально и контролируют по показаниям измерителей температуры  $I$  и  $II$ .

9. При достижении  $t_{ж} = 80$  °С (кипение с недогревом) и  $t_c = 101–103$  °С уменьшают мощность водоподогревателя, поворачивают ручку регулятора  $I0$  против часовой стрелки до минимума ( $t_{ж} = \text{const}$ ).

10. Устанавливают перегрев  $\Delta T \leq 5$  °С, отрегулировав выходное напряжение автотрансформатора  $I2$ .

11. Производят отсчёт температуры жидкости  $t_{ж}$  по измерителю температуры II и температуру стенки медного цилиндра по измерителям температуры I и II.

**Напомним:**

– первый канал измерителя I измеряет температуру в верхней точке боковой поверхности цилиндра  $t_1$  (термопара 5);

– первый канал измерителя II измеряет температуру на боковой поверхности цилиндра  $t_2$  (термопара 4), второй канал измерителя II – измеряет температуру среды  $t_{ж}$  (термопара 3).

12. Производят отсчет напряжения на нагревательном элементе  $U_n$  по мультиметру.

13. Переключают тумблер  $b$  в положение  $U_0$  и производят отсчет напряжения на образцовом сопротивлении  $U_0$ .

14. Повторяют пункты 11–13 при других значениях мощности в цепи нагревателя.

Результаты измерений заносят в табл. 4.

Таблица 4

**Протокол наблюдений**

Номер опыта	$t_{ж},$ °C	$t_1,$ °C	$t_2,$ °C	$U_n,$ В	$U_0,$ мВ	$I,$ А	$Q,$ Вт
1							
2							
3							
4							

**Обработка результатов эксперимента**

Средний коэффициент теплоотдачи от поверхности обогреваемого цилиндра к кипящей воде, определяемый в эксперименте, вычисляют по формуле:

$$\alpha_{\text{экс}} = \frac{Q}{F(t_c - t_{ж})}, \quad (18)$$

где  $Q$  – тепловой поток, передаваемый от поверхности пластины к воде, Вт;  $F$  – площадь поверхности цилиндра,  $m^2$ ;  $t_c = (t_1+t_2)/2$  – средняя температура поверхности;  $t_{ж}$  – температура жидкости.

Тепловой поток определяют по мощности, выделяющейся в нагревателе:

$$Q = U_n(U_0/R_0), \quad (19)$$

где  $U_n$  – падение напряжения на нагревателе цилиндра, В;  $U_0$  – падение напряжения на образцовом сопротивлении  $R_0$ , В.

По формуле (15) вычисляют расчетное значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{расч}$ , полагая, что  $q = Q/F$ .

Полученные результаты, соответствующие всем режимам, заносят в табл. 5.

Таблица 5

Номер режима	$Q$ , Вт	$t_c$ , °С	$t_{ж}$ , °С	$\alpha_{экс}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	$p$ , Па	$\alpha_{расч}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
1							
2							
3							
4							

По данным табл. 5 строят графики зависимостей  $\alpha_{экс}(\Delta T)$  и  $\alpha_{расч}(\Delta T)$ , на основании которых делают выводы по работе.

### Отчет о лабораторной работе

В отчете о лабораторной работе должны быть представлены:

1. Схема экспериментальной установки.
2. Характеристики измерительных приборов.
3. Протокол наблюдений, подписанный преподавателем,
4. Расчеты по обработке опытных данных, сопоставление  $\alpha_{экс}$  и

$\alpha_{расч}$ .

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

#### Задание

1. Проработав соответствующие разделы учебной литературы, составить ясное представление о механизме теплоотдачи при вынужденном движении жидкости в трубе и свободной конвекции со стороны воздуха.
2. Усвоить методику эксперимента и обработки экспериментальных данных.
3. Сопоставить результаты опытных и расчетных значений коэффициентов теплоотдачи и коэффициентов теплопередачи.

#### Теоретические предпосылки экспериментального метода

Экспериментальная установка позволяет определить коэффициент теплопередачи от воды к воздуху через разделяющую их стенку трубы. Внутри трубы насосом прокачивается нагретая вода, реализуется вынужденное течение жидкости. Снаружи труба охлаждается воздухом в результате свободной конвекции. Наружная поверхность трубы на одной половине длины – гладкая, на другой – ребристая. Цель работы – определение коэффициентов теплопередачи от воды, текущей внутри трубы, к воздуху через гладкую и ребренную поверхности трубы.

#### Участок гладкой трубы

Линейный коэффициент теплопередачи  $k_l$  через стенку гладкой трубы рассчитывается по формуле

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}, \quad (20)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней поверхности трубы, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности гладкой трубы к окружающему воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала трубы (медь);  $d_1$  – внутренний диаметр гладкой трубы, м;  $d_2$  – наружный диаметр гладкой трубы.

В условиях, когда толщина стенки трубы из меди много меньше ее внутреннего диаметра ( $\delta \ll d_1$ ) и, учитывая высокое значение коэффициента теплопроводности меди ( $\lambda = 390$  Вт/(м·К)), уравнение (20) можно представить в виде

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (21)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи через плоскую стенку, отнесенный к единичной поверхности гладкой трубы, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При ламинарном вязкостном режиме течения воды внутри трубы, средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  может быть определен из критериального уравнения

$$Nu_1 = 1,55 \left( Pe_1 \frac{d_1}{l_{гл}} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_{ст}}{\mu_1} \right)^{0,14}, \quad (22)$$

где  $Pe_1 = \frac{w_1 d_1}{a_1}$  – критерий Пекле для воды;  $a_1$  – коэффициент теплопроводности воды, м<sup>2</sup>/с;  $w_1 = \frac{4M}{\rho \pi d_1^2}$  – скорость движения воды внутри

трубы, м/с;  $M$  – массовый расход воды, кг/с;  $l_{гл}$  – длина участка гладкой трубы, м;  $\rho_1$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $Nu_1 = \frac{\alpha_1 d_1}{\lambda_1}$  – критерий Нуссельта

для воды;  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К);  $\mu_{ст}, \mu_1$  – коэффициенты динамической вязкости воды при температуре стенки и температуре воды соответственно, Па·с.

Тепло от наружной поверхности гладкой трубы отдается естественной конвекцией к воздуху. При малых температурных перепадах, когда  $Gr_2 \cdot Pr_2 \leq 1$ ,  $Nu_2 = 0,5$  и  $\alpha_2 = 0,5 / \lambda_2 \cdot d_2$ , режим называется пленочным, а интенсивность теплообмена определяется теплопроводностью воздуха.



При увеличении температурного напора коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к воздуху определяется из уравнения

$$\text{Nu}_2 = (0,5\text{Gr}_2 \cdot \text{Pr}_2)^{0,25}, \quad (23)$$

где:  $\text{Gr}_2 = \frac{gd_2^3}{\nu_2^2} \beta_2 \Delta t$  – критерий Грасгофа для воздуха,  $\nu_2$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $d_2$  – наружный диаметр гладкой трубы, м;  $\beta_2 = \frac{1}{T_2}$  – коэффициент объемного расширения воздуха при температуре воздуха  $T_2$ , 1/К;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $\Delta t = t_{\text{ст}} - t_2$  – разность между температурами наружной поверхности гладкой трубы и воздухом, °С;  $\text{Pr}_2 = \frac{\nu_2}{a_2}$  – критерий Прандтля для воздуха,  $a_2$  – коэффициент температуропроводности воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $\text{Nu}_2 = \frac{\alpha_2 d_2}{\lambda_2}$  – критерий Нуссельта для воздуха,  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К).

### Оребренный участок трубы

Оребренная поверхность состоит из поверхности ребер и поверхности межреберных участков. Общий тепловой поток  $Q$ , которым обменивается оребренная поверхность трубы с окружающим воздухом, складывается из потоков теплоты, отданной ребрами  $Q_p$  и межреберными участками  $Q_{\text{мп}}$ . Как известно,

$$Q_p = \alpha_p \Delta t E F_p; \quad (24)$$

$$Q_{\text{мп}} = \alpha_2 \Delta t F_{\text{мп}}, \quad (25)$$

$$E = \frac{\Delta t_{\text{ср}}}{\Delta t} = \frac{t_{\text{ср}} - t_2}{t_0 - t_2}. \quad (26)$$

Здесь:  $\alpha_p$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности ребер к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от межреберных участков к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_p$  – суммарная площадь поверхности ребер, м<sup>2</sup>;  $F_{\text{мп}}$  – площадь поверхности межреберных участков трубы, м<sup>2</sup>;  $\Delta t = t_0 - t_2$ ,

где  $t_0$  – температура в основании ребра, °С;  $t_2$  – температура воздуха, окружающего ребра и межреберные участки трубы, °С;  $E$  – коэффициент эффективности ребра;  $t_{cp}$  – средняя температура поверхности ребра.

Для медного ребра можно принять  $E \approx 1$ . Принимаем также  $\alpha_2 = \alpha_p$ . Тогда общий тепловой поток  $Q$  через оребренную поверхность трубы будет равен

$$Q = Q_p + Q_{mp} = \alpha_p \Delta t E F_p + \alpha_2 \Delta t F_{mp} = \alpha_2 \Delta t (F_p E + F_{mp}). \quad (27)$$

Коэффициент теплопередачи через оребренную стенку трубы находим из уравнения

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2 \beta}}, \quad (28)$$

$$\beta \cong \frac{F_{pc}}{\pi d_1 l_{op}}, \quad (29)$$

$$F_{pc} = F_p + F_{mp}, \quad (30)$$

$$F_p = N\pi(d_p^2 - d_2^2)/2, \quad (31)$$

$$F_{mp} = \pi d_2 (l_{op} - \delta_p N), \quad (32)$$

где  $l_{op}$  – длина участка оребренной трубы, м;  $N$  – число ребер на оребренной части трубы,  $\delta$  – толщина ребра, м;  $d_p$  – наружный диаметр ребра, м;  $d_2$  – наружный диаметр гладкой трубы, м.

### Устройство экспериментальной установки

Установка позволяет определить средний коэффициент теплопередачи от нагретой воды, текущей в трубе, к воздуху через гладкую и оребренную наружные поверхности трубы в условиях естественной конвекции.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 8. На передней панели 1 стенда находится двухканальный измеритель температуры 2 типа ТРМ200, подключённый к восьми хромель-копелевым термопарам ( $t_1-t_8$ ). Через переключатель термопар 11 термопары соединены с измерителем температур 2. В нижней части панели находятся три тумблера –

«Сеть», «Насос», «Нагрев». Рабочим участком стенда являются гладкая 4 и оребренная 3 трубы, состоящие каждая из двух частей и соединенные последовательно (на схеме гладкая и оребренная трубы изображены как одна часть). Параметры гладкой трубы: внутренний диаметр  $d_1 = 13$  мм, наружный диаметр  $d_2 = 15$  мм, длина  $l_{гп} = 2200$  мм (двух частей). Параметры оребренной трубы: внутренний и наружный диаметры такие же как и у гладкой трубы, длина 1920 мм, наружный диаметр ребра  $d_p = 60$  мм, толщина ребра  $\delta_p = 0,5$  мм. Через трубы с помощью насоса 8 (включается тумблером «Насос») циркулирует нагретая в термостате 5 вода. Объёмный расход воды измеряется расходомером 6 (или ротаметром 7 для малых расходов воды,  $G = (8-10) \cdot 10^{-3}$  л/с). На входном патрубке термостата 5 находится кран  $K_1$ , регулирующий величину объёмного расхода воды в трубах 3 и 4 в пределах 5–40 л/час. Течение жидкости в трубах – ламинарное с максимальной скоростью порядка 0,05 м/с. Краны  $K_2$  и  $K_3$  служат для удаления воздуха из системы при ее заполнении водой через расширительный бачок 9. Температура жидкости в термостате 5 регулируется блоком 10 термостата в пределах 25–65 °С. Включение нагревателя термостата производится тумблером «Нагрев».

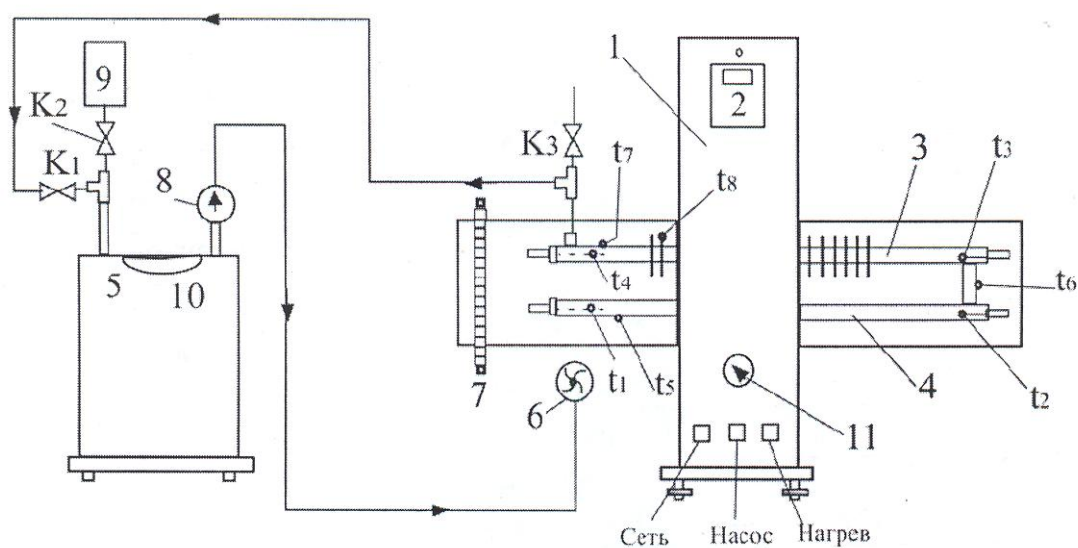


Рис. 8. Схема экспериментальной установки

1 – передняя панель стенда; 2 – измеритель температур; 3 – оребренная труба; 4 – гладкая труба; 5 – термостат; 6 – расходомер; 7 – ротаметр; 8 – циркуляционный насос; 9 – расширительный бачок; 10 – регулятор температуры; 11 – переключатель термопар;  $K_1$ – $K_3$  – краны;  $t_1$ – $t_8$  – измеряемые температуры

## Выполнение работы

1. Включают электропитание установки тумблером «Сеть».
2. Включают измеритель температуры 2.
3. Закрывают кран  $K_3$ .
4. Включают циркуляционный насос тумблером «Насос» термостата.
5. Краном  $K_1$  устанавливают расход воды не более  $(10-15) \cdot 10^{-3}$  л / с.
6. Включают термостат тумблером «Нагреватель».
7. С помощью регулятора температуры 10 устанавливают требуемую температуру опыта в пределах 40–60 °С.
8. С помощью двухканального измерителя температур 2 измеряют температуру воды на входе в гладкую трубу  $t_3$ . При достижении требуемой температуры и выхода экспериментального стенда на стационарный режим начинают проводить измерения.
9. Измеряют температуры:
  - $t_1$  – температуру воды на входе в оребренную трубу;
  - $t_2$  - температуру воды на выходе из оребренной трубы;
  - $t_3$  – температуру воды на входе в гладкую трубу;
  - $t_4$  – температуру воды на выходе из гладкой трубы;
  - $t_5$  – температуру на внешней поверхности оребренной трубы;
  - $t_6$  – температуру на торце ребра ( $t_{m,p}$ );
  - $t_7$  – температуру на внешней поверхности гладкой трубы;
  - $t_8$  – температуру воздуха в помещении лаборатории вблизи трубы.
10. С помощью расходомера 6 (или ротаметра 7) и секундомера измеряют расходы воды  $M$  (определяют промежутки времени  $\Delta\tau$ , за который через сечение труб прошли соответствующие объемы воды).
11. Результаты измерений заносят в протокол наблюдений (табл. 6).
- 120 По заданию преподавателя переходят на другой температурный режим опыта и (или) другой расход воды и повторяют пункты 7–11.

Необходимо провести измерения при двух-трех различных режимах опыта. Для того, чтобы убедиться в стационарности режимов течения воды и теплообмена, на каждом режиме проводят 3–4 серии измерений с интервалом порядка 5 минут.

## Протокол наблюдений

Номер опыта	$\Delta\tau$ , с	$M$ , кг/с	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$
			°C							
1										
2										
3										
4										

## Обработка и оформление результатов

По результатам проведенных измерений рассчитывают коэффициенты теплопередачи от гладкой и оребренной поверхностей. Методика расчета приведена ниже. Необходимы для расчетов свойства вода и воздуха приведены в Приложении.

1. Средняя температура воды в гладкой трубе

$$\bar{t}_{в,гп} = \frac{t_3 + t_4}{2}, \quad (33)$$

2. Тепловой поток через стенку гладкой трубы

$$Q_{гп} = c_p (Mt_3 - t_4), \quad (34)$$

где  $M$  – расход воды, кг/с,  $c_p$  – изобарная теплоемкость воды, кДж/(кг·К).

3. Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке гладкой трубы (без учета термического сопротивления стенки трубы)

$$\alpha_{1,гп} = \frac{Q_{гп}}{(t_{6,гп} - t_{ст})\pi d_1 l_{гп}}, \quad (35)$$

где  $t_{ст} = t_7$ ;  $d_1$  – внутренний диаметр гладкой трубы, м;  $l_{гп}$  – длина участка гладкой трубы, м.

4. Коэффициент теплоотдачи от наружной стенки гладкой трубы к воздуху

$$\alpha_{2,гп} = \frac{Q_{гп}}{(t_7 - t_8)\pi d_2 l_{гп}}, \quad (36)$$

5. Коэффициент теплопередачи от воды к воздуху через стенку гладкой трубы

$$k_{\text{гл}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1,\text{гл}}} + \frac{1}{\alpha_{2,\text{гл}}}}. \quad (37)$$

6. Средняя температура ребра

$$\bar{t}_p = \frac{t_5 + t_6}{2}, \quad (38)$$

7. Тепловой поток через наружную поверхность оребренной трубы

$$Q_{\text{ор}} = c_p M (t_1 - t_2), \quad (39)$$

8. Средняя температура воды по длине оребренной трубы

$$\bar{t}_{\text{в,ор}} = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (40)$$

9. Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке оребренной трубы

$$\alpha_{1,\text{ор}} = \frac{Q_{\text{ор}}}{(t_{\text{в,ор}} - t_5) \pi d_1 l_{\text{ор}}}, \quad (41)$$

10. Коэффициент теплоотдачи от оребренной поверхности к воздуху

$$\alpha_{2,\text{ор}} = \frac{Q_{\text{ор}}}{(F_{\text{мп}} + F_p)(t_p - t_8)}. \quad (42)$$

Площади ребер и межреберных участков рассчитываются по формулам (31) и (32).

11. Коэффициент теплопередачи от воды к воздуху через оребренную трубу

$$k_{\text{оп}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1,\text{оп}}} + \frac{1}{\alpha_{2,\text{оп}}\beta}}, \quad (43)$$

где коэффициент  $\beta$  рассчитывается по формуле (29).

Далее рассчитывают коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи для гладкой трубы с использованием критериальных уравнений.

1. Критерий Нуссельта для расчета коэффициента теплоотдачи от воды к стенке гладкой трубы

$$Nu_1 = 1,55 \left( Re_1 Pr_1 \frac{d_1}{l_{\text{гл}}} \right)^{0,33} \left( \frac{\mu_{\text{ст}}}{\mu_1} \right)^{0,14}, \quad (44)$$

2. Расчетное значение коэффициент теплоотдачи от воды к стенке гладкой трубы:

$$\alpha_{1,\text{гл}}^{\text{расч}} = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_1}, \quad (45)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности воды при средней температуре воды  $\bar{t}_{\text{в,гл}}$ .

3. Критериальное уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи от стенки гладкой трубы к воздуху

$$Nu_2 = 0,5(Gr_2 \cdot Pr_2)^{0,25}. \quad (46)$$

4. Расчетный коэффициент теплоотдачи от стенки гладкой трубы к воздуху

$$\alpha_{2,\text{гл}}^{\text{расч}} = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_2}, \quad (47)$$

где  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности воздуха.

5. Расчетный коэффициент теплопередачи от воды к воздуху через стенку гладкой трубы

$$k_{\text{гл}}^{\text{расч}} \approx \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1,\text{гл}}^{\text{расч}}} + \frac{1}{\alpha_{2,\text{гл}}^{\text{расч}}}}, \quad (48)$$

Результаты расчетов сводят в табл. 7, 8.

Таблица 7

Результаты расчетов для участка гладкой трубы

№	Опытные значения			Расчетные значения						
	$\alpha_{1,\text{гл}},$ Вт/ (м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_{2,\text{гл}},$ Вт/ (м <sup>2</sup> ·К)	$k_{\text{гл}},$ Вт/ (м <sup>2</sup> ·К)	Re <sub>1</sub>	Pr <sub>1</sub>	$\alpha_{1,\text{гл}}^{\text{расч}},$ Вт/ (м <sup>2</sup> ·К)	Gr <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	$\alpha_{2,\text{гл}}^{\text{расч}}$ Вт/ (м <sup>2</sup> ·К)	$k_{\text{гл}}^{\text{расч}}$ Вт/ (м <sup>2</sup> ·К)
1										
2										
3										
4										

Таблица 8

Результаты расчетов для участка оребренной трубы

№	$\alpha_{1,\text{ор}},$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_{2,\text{ор}},$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$k_{\text{ор}},$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
1			
2			
3			
4			

В расчетах не учтено возможное влияние лучистого теплообмена между наружными поверхностями гладкой и оребренной труб с воздухом.

### Отчет о лабораторной работе

В отчете о лабораторной работе должны быть представлены:

1. Схема экспериментальной установки.
2. Характеристики измерительных приборов.



3. Протокол наблюдений, подписанный преподавателем.
4. Расчеты и сводные таблицы обработки опытов.
5. Анализ опытных данных, выводы по результатам сопоставления опытных и расчетных данных.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»**

#### **Задание**

Изучив соответствующие разделы рекомендуемой учебной литературы [1–3] студент должен:

1. Уяснить теоретические положения и методику проводимого эксперимента по определению коэффициента теплопередачи рекуперативного теплообменного аппарата типа «труба в трубе».
2. Провести измерения коэффициентов теплопередачи для двух схем движения теплоносителей – прямотока и противотока.
3. Сопоставить значения коэффициентов теплопередачи, полученные в эксперименте, с расчетными значениями, полученными из критериальных уравнений.

#### **Теоретические предпосылки экспериментального метода**

- а) Определение экспериментального значения коэффициента теплопередачи

Теплопередачей называется процесс теплообмена между двумя средами. В теплообменном аппарате рекуперативного типа теплопередача осуществляется между двумя средами с разной температурой, одновременно омывающими поверхность теплопередачи с двух сторон. В теплообменнике типа «труба в трубе», (одна труба расположена внутри другой трубы), одна из сред движется внутри трубы меньшего диаметра, а вторая среда в кольцевом зазоре, образованном двумя трубами большего и меньшего диаметров. В данной работе в качестве сред, обменивающихся теплотой, используются горячая и

холодная вода при их вынужденном движении. Горячая вода течет по внутренней трубе, а холодная вода – по наружной трубе. В работе изучается теплопередача при движении сред как прямотоком, так и противотоком.

Тепловой поток, которым обмениваются среды в ходе теплопередачи в теплообменниках трубчатого типа, равен

$$Q = \pi k_l \Delta t_m l, \quad (49)$$

где  $k_l$  – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К);  $\Delta t_m$  – средняя логарифмическая разность температур между средами в теплообменнике, К;  $l$  – длина трубы.

Величина  $k_l$  для цилиндрической поверхности рассчитывается по формуле:

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_{тр}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}, \quad (50)$$

где  $\frac{1}{\alpha_1 d_1}$  и  $\frac{1}{\alpha_2 d_2}$  – линейные термические сопротивления теплоот-

дачи первой и второй сред, (К·м)/Вт;  $\frac{1}{2\lambda_{тр}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}$  – линейное термиче-

ское сопротивление теплопроводности для цилиндрической стенки, разделяющей среды, (К·м)/Вт;  $d_1, d_2$  – внутренний и наружный диаметры внутренней трубы, м;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от горячей воды к внутренней поверхности внутренней трубы, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности внутренней трубы к холодной воде, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda_{тр}$  – коэффициент теплопроводности материала внутренней трубы, Вт/(м·К).

Для сред, движущихся прямотоком или противотоком, величина  $\Delta t_m$  определяется по формуле

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}}. \quad (51)$$

Здесь:  $\Delta t_6$  и  $\Delta t_m$  – наибольшая и наименьшая разности температур между средами при их движении в теплообменнике.

При расчете и сопоставлении эффективности аппаратов различной конструкции (гладкотрубных, трубчаторебристых, пластинчатых и др.) использование величины  $k_l$  затруднительно. Обычно используется величина коэффициента теплопередачи  $k$ , отнесенная к  $1 \text{ м}^2$  теплопередающей поверхности, выбранной в качестве расчетной. Расчетной может быть выбрана поверхность  $F_1$  со стороны среды 1 или поверхность  $F_2$  со стороны среды 2.

Для аппарата «труба в трубе» в качестве расчетной принимаем наружную поверхность внутренней трубы  $F_2 = \pi d_2 l_{\text{тр}}$ , тогда

$$K_{F_2} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_2}{d_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{тр}}} \cdot \frac{d_2}{d_{\text{тр}}} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot \quad (52)$$

Здесь:  $\delta_{\text{ст}}$  – толщина стенки внутренней трубы, разделяющей жидкости, м;  $d_{\text{тр}} = (d_1 + d_2)/2$  – средний диаметр внутренней трубы, м.

С учетом потерь в окружающую среду величину теплового потока аппарата  $Q_{\text{ап}}$  рассчитывают из уравнения теплового баланса

$$Q_{\text{ап}} = Q_{1,\text{отв}} = Q_{2,\text{подв}} + Q_{\text{потери}} \cdot \quad (53)$$

После преобразования имеем

$$Q_{\text{ап}} = Q_{1,\text{отв}} = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (t'_{\text{гор}} - t''_{\text{гор}}) \quad (54)$$

$$Q_{\text{ап}} = Q_{2,\text{подв}} = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t''_{\text{хол}} - t'_{\text{хол}}) + Q_{\text{потери}} \cdot \quad (55)$$

Здесь:  $Q_{1,\text{отв}}$  – тепловой поток, отдаваемый горячей водой, Вт;  $Q_{2,\text{подв}}$  – тепловой поток, воспринимаемый холодной водой, Вт;  $G_1$  и  $G_2$  – массовые расходы горячей и холодной воды соответственно, кг/с;  $c_{p1}$  и  $c_{p2}$  – средние удельные массовые теплоемкости горячей и холод-

ной воды, кДж/(кг·К);  $t'_{гор}, t''_{гор}$  – температура горячей воды на входе и выходе из внутренней трубы °С;  $t'_{хол}, t''_{хол}$  – температура холодной воды на входе и выходе из кольцевого зазора.

Температуры горячей и холодной воды изменяются незначительно, поэтому величина  $c_p$  может быть принята постоянной и равной  $c_{p1} = c_{p2} = 4,174$  кДж/(кг·К).

Массовые расходы горячей  $G_1$  и холодной  $G_2$  воды рассчитываются по формулам

$$G_1 = V_1 \rho_B = w_1 f_1 \rho_B, \quad (56)$$

$$G_2 = V_2 \rho_B = w_2 f_2 \rho_B, \quad (57)$$

где:  $V_1$  и  $V_2$  – объемные расходы горячей и холодной воды, (м<sup>3</sup>/с), которые определяют экспериментально с помощью объемных расходомеров (счетчиков воды);  $f_1 = \pi d_1^2 / 4$  – поперечное сечение внутренней трубы, где течет горячая вода, м<sup>2</sup>;  $f_2 = \frac{\pi}{4} (d_3^2 - d_2^2)$  – поперечное сечение кольцевого канала между внутренней и наружной трубами, где течет холодная вода, м<sup>2</sup>;  $d_3$  – внутренний диаметр наружной трубы, м<sup>2</sup>;  $w_1$  и  $w_2$  – скорости течения горячей и холодной воды, м/с;  $\rho_B$  – плотность воды, величина которой принята для горячей и для холодной воды постоянной и равной  $\rho_B \approx 994$  кг/м<sup>3</sup>.

Экспериментальное значение коэффициента теплопередачи исследуемого теплообменника находят по формуле

$$k_{F2}^{экс} = \frac{Q_{ап}}{\Delta t_m F_2} = \frac{V_1 \cdot \rho_B \cdot c_{p,1} (t'_1 - t''_1)}{\Delta t_m \cdot \pi d_2 l_{тр}}. \quad (58)$$

#### б) Определение расчетного значения коэффициента теплопередачи теплообменника типа «труба в трубе»

Расчетное значение  $k_{F2}^{расч}$  определяют из уравнения (52). Для этого необходимо знать величины коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  со стороны горячей и холодной воды. Величины  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  можно

рассчитать из критериальных уравнений, описывающих теплоотдачу при вынужденном движении при известном режиме течения среды. Режим движения среды определяется с помощью критерия Рейнольдса ( $Re$ ):

для горячей воды

$$Re_{гор} = Re_1 = \frac{w_{B,1} \cdot d_1}{\nu_B}, \quad (59)$$

для холодной воды

$$Re_{хол} = Re_2 = \frac{w_{B,2} \cdot d_{эКВ}}{\nu_B}. \quad (60)$$

Здесь  $d_{эКВ} = \frac{4f_{сеч}}{P}$  – эквивалентный диаметр кольцевого канала,

где течет холодная вода, м;  $f_{сеч}$  – поперечное сечение канала, м<sup>2</sup>;  $P$  – смоченный периметр канала, м.

Для кольцевого канала имеем:

$$d_{эКВ} = \frac{4 \frac{\pi}{4} (d_3^2 - d_2^2)}{\pi (d_3 + d_2)} = d_3 - d_2. \quad (61)$$

Скорости горячей  $w_1$  и холодной  $w_2$  воды рассчитывают из уравнений (56) и (57) с учетом экспериментальных значений объемных расходов  $V_1$  и  $V_2$  горячей и холодной воды.

Напомним, что при ламинарном течении (вязкостный режим) внутри труб и каналов при  $Re \leq Re_{крI} = 2300$  критериальное уравнение имеет вид и для горячей, и холодной воды

$$Nu = 1,55 \left( Re_{ж} Pr_{ж} \cdot \frac{d}{l_{тр}} \right)^{0,33}. \quad (62)$$

Для турбулентного течения для горячей воды при  $Re \geq 10^4$  уравнение имеет вид

$$Nu = 0,21 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ж,ст}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l, \quad (63)$$

где  $Pr_{ж}$  и  $Pr_{ж,ст}$  – значения критериев  $Pr$  при средней температуре горячей воды  $\bar{t}_{ж1} = (t'_{гор} + t''_{гор}) / 2$  и при температуре стенки трубы.

Для горячей воды критерий Нуссельта рассчитывают по формуле  $Nu_1 = \frac{\alpha_1 d_1}{\lambda_B}$  ( $\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности горячей воды при средней температуре, Вт/(м·К). Критерий Прандтля находят из таблиц для воды при  $\bar{t}_{ж1}$ .

При движении холодной воды внутри кольцевого канала между трубами при переходном или турбулентном режимах движения для расчета  $\alpha_2$  рекомендовано уравнение

$$Nu_2 = 0,017 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,4} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ж,ст}} \right)^{0,25} \cdot \left( \frac{d_3}{d_2} \right)^{0,13}. \quad (64)$$

Здесь:  $Nu_2 = \frac{\alpha_2 \cdot d_{эКВ}}{\lambda_B}$ ;  $Re = \frac{w_2 \cdot d_{эКВ}}{\nu_B}$ . Значения теплопроводности  $\lambda_B$  и  $\nu_B$  находят при средней температуре холодной воды.

Поправки на изменение свойств жидкости  $\left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ж,ст}} \right)^{0,25}$  в уравнениях (63) и (64) принимаем равной 1. С учетом найденных из критериальных уравнений величины  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  по уравнению (52) вычисляем расчетное значение коэффициента теплопередачи  $k_{F2}^{расч}$ .

### Устройство экспериментальной установки

Лабораторная установка состоит из экспериментального участка теплообменника типа «труба в трубе»  $I$  (рис. 1) и двух замкнутых контуров горячей и холодной дистиллированной воды. Горячая вода движется по внутренней трубе, холодная вода – в кольцевом зазоре между трубами.

Замкнутый контур горячей воды включает в себя: внутреннюю трубу теплообменника с внутренним диаметром  $d_{\text{вн}} = 13$  мм и наружным диаметром  $d_{\text{нар}} = 15$  мм, термопары  $t_1$  и  $t_2$ , расположенные на входе и выходе трубы, насос 3, объемный расходомер 10, термостат 2 с регулятором температуры, расширительный бачок 4, вентиль регулирования расхода горячей воды 6, вентиль 5 для выпуска воздуха из системы горячей воды, штуцеры 13 и 16 для подсоединения горячей воды к внутренней трубе.

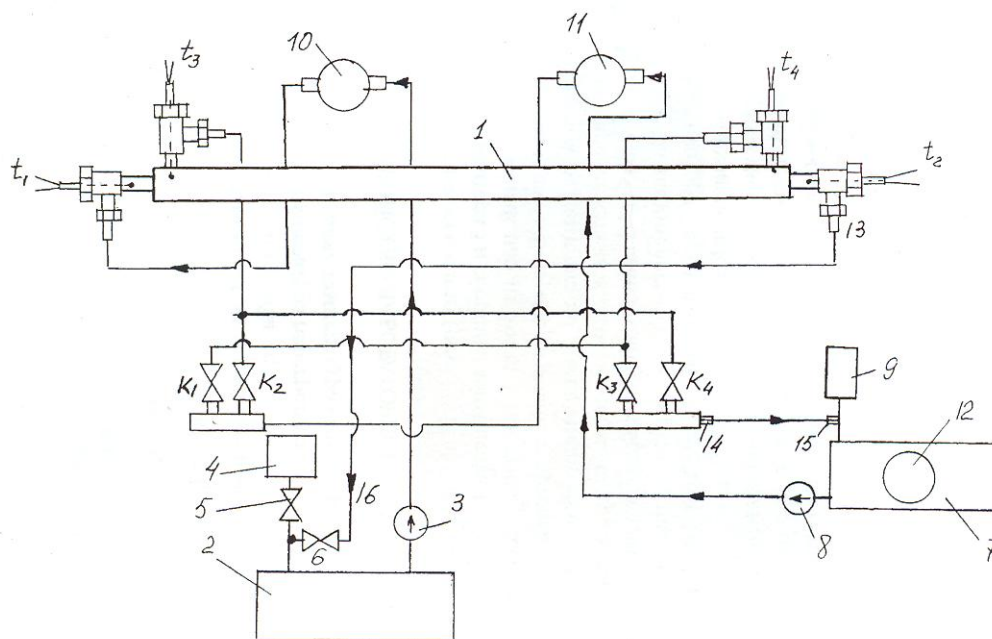


Рис. 9. Схема экспериментальной установки

1 – теплообменник «труба в трубе»; 2 – термостат; 3, 8 – насосы; 4, 9 – расширительные бачки; 7 – радиатор (холодильник); 10, 11 – расходомеры; 12 – вентилятор холодильника; 13–16 – штуцеры; 5, 6,  $K_1$ – $K_4$  – вентили;  $t_1$ – $t_4$  – измеряемые температуры

Замкнутый контур холодной воды состоит из: наружной трубы теплообменника 1 с наружным диаметром  $d_{\text{нар}} = 25$  мм и внутренним диаметром  $d_{\text{вн}} = 23$  мм, термопар  $t_3$  и  $t_4$  на входе и выходе воды в кольцевого канала между наружной и внутренней трубами теплообменника, насоса холодной воды 8, воздушного охладителя (радиатора) воды 7 с вентиляторами 12, расширительного бачка охладителя воды 9, объемного расходомера холодной воды 11, штуцеров 14 и 15 для подключения холодной воды в наружной трубе, вентилей  $K_1$ – $K_4$  для изменения направления движения холодной воды прямотоком или противотоком и регулировки расхода холодной воды. Для охла-

ждения воды в охладителе используется три вентилятора. Открытие вентилей  $K_2$  и  $K_3$ , и закрытие вентилей  $K_1$  и  $K_4$  обеспечивает прямоточное движение горячей и холодной воды в теплообменнике 1. Открытие вентилей  $K_1$  и  $K_4$  и закрытие вентилей  $K_2$  и  $K_3$  служит для обеспечения противотока.

Длина горячей и холодной труб одинакова и равна 1 м.

На передней панели стенда находится двухканальный измеритель температуры типа ТРМ200, подключенный через переключатель к четырем хромель-копелевым термопарам ( $t_1-t_4$ ). В нижней части панели находятся пять тумблеров: «Сеть», «Насос нагревателя», «Насос холодильника», «Нагрев», «Вентиляторы холодильника».

### Выполнение работы

1. При открытых вентилях 5, 6,  $K_1-K_4$  проверяют заполнение дистиллированной водой термостата 2 и охладителя 7, убедившись, что расширительные бачки 4 и 9 заполнены примерно на половину.

2. Тумблером «Сеть» включают электропитание установки.

3. На регуляторе термостата 2 задают предел температуры горячей воды 45–60 °С. Включают насос горячей воды с помощью тумблера «Насос нагревателя».

4. Проверяют работу расходомера горячей воды 10. В случае, если счетчик горячей воды работает не устойчиво, удаляют воздушные пробки в потоке, несколько раз включая и выключая тумблер «Насос нагревателя» при открытом продувочном вентиле 5.

5. Вентилем 6 регулируют необходимый расход горячей воды (примерно 1 л за 60 сек).

6. Тумблером «Насос холодильника» включают насос 8 холодной воды, движущейся через воздушный охладитель 7 и кольцевой канал теплообменника.

7. Проверяют работу расходомера 11 холодной воды по методу, указанному в п.4, включая и выключая тумблер «Насос холодильника».

8. Вентилем  $K_3$  устанавливают необходимый расход холодной воды в кольцевом канале (примерно 1 л за 60 сек).

9. Включают вентилятор охладителя 7 с помощью тумблера «Вентилятор холодильника».



10. Включают нагрев воды в термостате 2 с помощью тумблера «Нагрев».

11. Включают измеритель температуры горячей и холодной воды.

12. Для режима «прямоток» закрывают вентили  $K_1$  и  $K_4$  и открывают вентили  $K_2$  и  $K_3$ .

13. При достижении температуры  $t_1$  порядка 45–50 °С производят измерения температур  $t_1$ – $t_4$ , меняя положение переключателя термопар, и расходов горячей и холодной воды с помощью секундомера и расходомеров 10 и 14 (определяют промежутки времени  $\Delta\tau$ , за который через сечение труб прошли соответствующие объемы воды).

14. Через 1–2 минуты повторяют 3–4 раза измерения по пункту 13. Результаты заносят в табл. 9.

15. Для режима «противоток» открывают вентили  $K_1$  и  $K_4$  и закрывают вентили  $K_2$  и  $K_3$ . Вентилем  $K_4$  устанавливают расход холодной воды (примерно 1 л за 60 сек). Повторяют измерения по пункту 13 и заполняют табл. 10.

Таблица 9

Таблица измерений при прямотоке воды в теплообменнике

№	Горячая вода					Холодная вода				
	$G_1$ , л	$\Delta\tau_1$ , с	$V_1$ , м <sup>3</sup> /с	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С	$G_2$ , л	$\Delta\tau_2$ , с	$V_2$ , м <sup>3</sup> /с	$t_3$ , °С	$t_4$ , °С
1										
2										
3										
4										

Таблица 10

Таблица измерений при противотоке воды в теплообменнике

№	Горячая вода					Холодная вода				
	$G_1$ , л	$\Delta\tau_1$ , с	$V_1$ , м <sup>3</sup> /с	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С	$G_2$ , л	$\Delta\tau_2$ , с	$V_2$ , м <sup>3</sup> /с	$t_3$ , °С	$t_4$ , °С
1										
2										
3										
4										

## Обработка результатов измерений

а) Экспериментальные значения коэффициентов теплопередачи для прямотока и противотока

1. Рассчитывают объемные расходы горячей  $V_1$  и холодной  $V_2$  воды

$$V_1 = \frac{G_1 \cdot 10^{-3}}{\Delta\tau_1}; \quad V_2 = \frac{G_2 \cdot 10^{-3}}{\Delta\tau_2},$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – объемы горячей и холодной воды в литрах за промежутки времени  $\Delta\tau_1$  и  $\Delta\tau_2$ . Для расчетов используют средние значения измеренных величин из серии из четырех опытов.

2. Рассчитывают величины тепловых потоков теплообменного аппарата  $Q_{\text{ап}}$ , отведенного от горячей воды  $Q_1$  и подведенного к холодной воде  $Q_2$  по формулам (53)–(55).

3. Находят потери в окружающую среду через наружную поверхность аппарата

$$Q_{\text{потери}} = Q_1 - Q_2.$$

4. Рассчитывают среднюю логарифмическую разность температур между средами в аппарате по формуле (51). Для прямотока  $\Delta t_{\text{с}} = t_1 - t_3$ ;  $\Delta t_{\text{м}} = t_2 - t_4$ , для противотока  $\Delta t_{\text{с}} = t_1 - t_4$ ;  $\Delta t_{\text{м}} = t_2 - t_3$ .

5. Экспериментальные значения коэффициентов теплопередачи для прямотока и противотока находят по формуле (58).

б) Определение расчетного значения коэффициента теплопередачи из критериальных уравнений для прямотока и противотока

1. Определяют скорости течения  $w_1$  и  $w_2$  горячей и холодной воды по формулам

$$w_1 = w_{\text{гор}} = \frac{\bar{V}_1}{f_1} = \frac{4\bar{V}_1}{\pi \cdot d_1^2}; \quad w_2 = w_{\text{хол}} = \frac{\bar{V}_2}{f_2} = \frac{4\bar{V}_2}{\pi(d_3^2 - d_2^2)}.$$

2. Рассчитывают величины  $Re_1$  и  $Re_2$  для горячей и холодной сред по формулам (59)–(61).
3. Определяют режимы течения для потоков горячей и холодной сред.
4. Выбирают расчетные критериальные уравнения для найденных режимов течения обеих сред (зависимости (63)–(64)).
5. Рассчитывают значения критериев  $Nu$ , коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .
6. Вычисляют коэффициент теплопередачи  $k_{F2}^{расч}$  по формуле (52).
7. Проводят сравнение величины  $k_{F2}^{экс}$  и  $k_{F2}^{расч}$  между собой для прямого и противотока и делают выводы.

### Отчет о лабораторной работе

В отчете должны быть представлены:

1. Схема экспериментальной установки.
2. Характеристики измерительных приборов.
3. Протокол наблюдений, подписанный преподавателем.
4. Расчеты по обработке опытных данных и сопоставлению коэффициентов теплопередачи  $k_{F2}^{экс}$  и  $k_{F2}^{расч}$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1981. – 416 с.

2. Теоретические основы хладотехники. Часть II. Тепломассообмен/ Э.И. Гуйго, В.Н. Филаткин, Г.Н. Данилова, С.Н. Богданов, О.Б. Цветков, Н.А. Бучко, В.Т. Плотников/ Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Колос, 1994. – 367 с.

3. Сборник задач по процессам теплообмена в пищевой и холодильной промышленности / Г.Н. Данилова, В.Н. Филаткин, М.Г. Щербов, Н.А. Бучко. – М.: Колос, 1995. – 303 с.

4. Лабораторный практикум по теплопередаче. Часть I: Учеб. пособие / О.Б. Цветков, А.В. Клецкий, Ю.А. Лаптев и др.; Под ред. О.Б. Цветкова и Ю.А. Лаптева. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013. – 57 с.

5. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче: Учеб. пособие / В.Н. Афанасьев, А.А. Афонин, С.И. Исаев и др.; Под ред. В.И. Крутова, Е.В. Шишова. – М.: Высш. шк., 1988. – 216 с.

6. Теоретические основы теплотехники. Лабораторный практикум: Учеб. пособие / С.А. Галаев, А.И. Кириллов, Э.Л. Китанин и др.; Под ред. С.З. Сапожникова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 256 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П1

### Теплофизические свойства сухого воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$\nu \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	Pr
20	2,59	21,4	15,06	0,703
30	2,67	22,9	16,00	0,701
40	2,76	24,3	16,96	0,699
50	2,83	25,7	17,95	0,698
60	2,90	27,2	18,97	0,696
70	2,96	28,6	20,02	0,694
80	3,05	30,2	21,09	0,692
90	3,13	31,9	22,10	0,690
100	3,21	33,6	23,13	0,688
120	3,34	36,8	25,45	0,686
140	3,49	40,3	27,80	0,684
160	3,64	43,9	30,09	0,689

## Теплофизические свойства воды на линии кипения

$t_n$ , °C	$C_p'$ , кДж/(кг·К)	$\lambda'$ , Вт/(м·К)	$a' \cdot 10^8$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu' \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu' \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta' \cdot 10^4$ , 1/К	$\sigma' \cdot 10^4$ , Н/м	Pr'
0	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	-0,63	765,4	13,5
10	4,191	0,580	13,8	1306	1,306	0,70	741,6	9,45
20	4,183	0,507	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,03
30	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	3,21	712,2	5,45
40	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	3,87	696,5	4,36
50	4,174	0,640	15,5	549,4	0,556	4,49	676,9	3,53
60	4,179	0,650	15,8	469,9	0,478	5,11	662,2	3,08
70	4,187	0,662	16,1	406,1	0,415	5,70	643,5	2,52
80	4,195	0,669	16,3	355,1	0,365	6,32	625,9	2,23
90	4,208	0,676	16,5	314,9	0,326	6,95	607,2	1,97
100	4,220	0,684	16,8	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	4,233	0,685	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	4,250	0,686	17,1	237,1	0,252	8,64	548,4	1,47
130	4,266	0,686	17,3	217,8	0,233	9,19	528,8	1,35
140	4,287	0,685	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,313	0,684	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	4,246	0,681	17,8	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	4,380	0,676	17,2	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	4,417	0,672	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,03
190	4,459	0,664	17,2	144,2	0,165	12,6	400,2	0,965

Окончание таблицы П2

$t_H,$ °C	$C_p',$ кДж/(кг·К)	$\lambda',$ Вт/(м·К)	$a' \cdot 10^8,$ м <sup>2</sup> /с	$\mu' \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu' \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$\beta' \cdot 10^4,$ 1/К	$\sigma' \cdot 10^4,$ Н/м	Pr'
200	4,505	0,658	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,932
210	4,555	0,649	16,7	130,5	0,153	14,1	354,1	0,915
220	4,614	0,640	16,5	124,6	0,148	14,8	331,6	0,898
230	4,681	0,629	16,3	119,7	0,145	15,9	310,0	0,888
240	4,76	0,617	16,0	114,8	0,141	16,8	285,5	0,883
250	4,87	0,605	15,5	109,0	0,137	18,1	261,9	0,884
260	4,98	0,593	15,2	105,9	0,135	19,7	237,4	0,892
270	5,12	0,578	14,7	102,0	0,133	21,6	214,8	0,905
280	5,30	0,565	14,3	98,1	0,131	23,7	191,3	0,917
290	5,50	0,548	13,7	94,2	0,129	26,2	168,7	0,944
300	5,76	0,532	13,0	91,2	0,128	29,2	144,2	0,986
310	6,11	0,514	12,2	88,3	0,128	32,9	120,7	1,05
320	6,57	0,494	11,3	85,3	0,128	38,2	98,10	1,14
330	7,25	0,471	10,2	81,4	0,127	43,3	76,71	1,25
340	8,20	0,446	8,95	77,5	0,127	53,4	56,70	1,42
350	10,10	0,431	7,90	72,6	0,126	66,8	38,16	1,70
360	14,65	0,372	4,20	66,7	0,126	109	20,21	2,66
370	40,32	0,338	1,85	56,9	0,126	264	4,709	6,80

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ СТУДЕНТАМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ В ЛАБОРАТОРИИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ КАФЕДРЫ ТОТХТ .....	4
ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПРИ РАБОТЕ В УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ .....	4
Общие правила.....	4
Правила работы на установках, находящихся под избыточным давлением .....	5
Правила работы студентов на установках с электропитанием...	5
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАВЛЕНИЯ, ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И РАСХОДА СРЕД.....	6
Измерение температуры .....	6
Измерение давления .....	8
Методы определения тепловых потоков .....	10
Измерение расхода жидкостей .....	10
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ОТ НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ К ВОЗДУХУ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ .....	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ .....	18
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ .....	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ .....	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ» .....	41
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	52
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	53



**Цветков Олег Борисович  
Лаптев Юрий Александрович  
Ширяев Юрий Николаевич  
Митропов Владимир Викторович  
Азарсков Вольдемар Михайлович  
Пятаков Георгий Леонидович  
Ефременкова Алла Константиновна  
Клюева Рингина Васильевна**

## **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ**

### **Часть II**

*Ответственный редактор*  
Т.Г. Смирнова

*Титульный редактор*  
Е.О. Трусова

*Компьютерная верстка*  
И.В. Гришко

*Дизайн обложки*  
Н.А. Потехина

*Печатается  
в авторской редакции*

---

Подписано в печать 23.12.2015. Формат 60×84 1/16  
Усл. печ. л. 3,49. Печ. л. 3,75. Уч.-изд. л. 3,5  
Тираж 200 экз. Заказ № С 100

---

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9