

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЖИДКОСТНО-ЖИДКОСТНОГО АППАРАТА
ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»**

**Учебно-методическое пособие
для выполнения лабораторных работ**

**Санкт-Петербург
2017**

УДК 621.184(075)
ББК 31.71я7
И 889

Исследование тепловых характеристик жидкостно-жидкостного аппарата типа «труба в трубе»: учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ / сост. В.А. Суслов, В.Н. Белоусов, А.Н. Иванов, С.В. Антуфьев /ВШТЭС СПбГУПТД.– СПб., 2017. -16 с.

В настоящем учебно-методическом пособии рассматриваются методы исследования процессов передачи теплоты в теплообменных аппаратах. Приводятся основные теоретические положения, схема лабораторной установки, порядок проведения эксперимента и обработки полученных опытных данных.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» ВШТЭ Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна В.С. Куров;
канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплосиловые установки» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I В.И. Крылов

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД в качестве учебно-методического пособия.

Редактор и корректор В.А. Басова
Техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2017 г., поз.20

Подп. к печати 11.10.17. Формат 60x84/16. Бумага тип. №1.
Печать офсетная. Печ.л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Изд. № 20. Цена “С”. Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© Высшая школа технологии и энергетики
Санкт-Петербургского государственного
университета промышленных технологий
и дизайна, 2017

© В.А.Суслов, В.Н.Белоусов, А.Н.Иванов,
С.В.Антуфьев, 2017

Введение

В программу обучения студентов специальности «Промышленная теплоэнергетика», наряду с обязательным курсом «Тепломассообмен», входит дисциплина «Тепломассообменное оборудование предприятий».

Теплообменным аппаратом называется устройство, в котором осуществляется передача тепла от одной рабочей среды к другой. В качестве рабочих сред в теплообменных аппаратах могут применяться пар, жидкие и газообразные вещества.

Передача тепла от одной рабочей среды к другой осуществляется либо через разделяющую поверхность, либо при непосредственном соприкосновении путём смешивания рабочих сред. В первом случае теплообменные аппараты называются *рекуперативными* (воздухоподогреватели, пароперегреватели, маслоохладители, экономайзеры и т.д.), а во втором – *смесительными* (градирни, деаэраторы, скрубберы и т.д.).

На интенсивность процесса теплопередачи в теплообменных аппаратах оказывают влияние физические свойства рабочих сред, их скорость, направление движения потоков относительно друг друга (прямоток, противоток, перекрёстный ток), равномерность распределения потоков по сечению, загрязнения и другие факторы.

Оценка тепловой эффективности различных теплообменных аппаратов производится по величине коэффициента теплопередачи k [Вт/(м²·°С)] и суммарным затратам мощности по обеим сторонам на преодоление сопротивления, отнесенным к единице поверхности теплообмена N_0 [Вт/м²].

В жидкостно-жидкостных теплообменных аппаратах и греющей, и нагреваемой рабочими средами являются жидкие теплоносители. Теплота передаётся от одной среды к другой непрерывно через разделяющую их стенку.

Они широко используются:

- в системах теплоснабжения в качестве водо-водяных подогревателей;
- для охлаждения масла водой в системах смазки подшипников паровых турбин и компрессорных машин;
- для подогрева жидкого топлива (мазута);
- для нагревания и охлаждения различных растворов в теплотехнологических процессах химической, пищевой, целлюлозно-бумажной и других отраслях промышленности.

По технологическому назначению и конструктивному оформлению жидкостно-жидкостные теплообменные аппараты весьма разнообразны. Большинство из них являются *кожухотрубчатыми*. Но в последнее время в различных отраслях промышленности получили распространение и пластинчатые теплообменники, состоящие из гофрированных пластин с различной формой профиля, и спиральные теплообменники. Такие аппараты обладают высокой интенсивностью процесса теплообмена, большой компактностью и малыми габаритами, что обеспечивает эффективность их работы и целесообразность их применения.

В рамки обучения, наряду с лекциями и практическими занятиями, входят и лабораторные работы, целью которых является приобретение студентами практических навыков по исследованию процесса теплопередачи в различных теплообменниках, в частности: исследование рекуперативных жидко-жидкостных теплообменных аппаратов типа «*труба в трубе*» с различными схемами движения рабочих сред.

Эти аппараты изготавливаются либо из цельнокатаных труб сварной конструкции, либо с сальниками на одном или на обоих концах трубы с целью удобства чистки.

Теплообменники типа «труба в трубе» подразделяются на:

- аппараты жёсткой конструкции (тип ТТ);
- аппараты с сальниками на одном или обоих концах труб (тип ТТ-С);

- аппараты с оребрѐнными внутренними трубами (тип ТТР).

Внутренние трубы с оребрением применяются для нагрева или охлаждения газообразных сред, поступающих в межтрубное пространство аппарата.

В табл.1 приведены основные размеры теплообменников «труба в трубе» жѐсткой конструкции типа ТТ, которые изготавливаются из труб углеродистой или нержавеющей стали.

Теплообменники этого типа применяют для нагрева и охлаждения жидкостей при давлении теплоносителей до 2,5 МПа и температуре теплоносителя, пропускаемого по внутренним трубам, до 450 °С.

Теплообменные аппараты типа «труба в трубе» могут компоноваться путем последовательного соединения их в секции и параллельного соединения секций между собой (рис. 1). Это позволяет создавать теплообменные аппараты от 1 до 250 м².

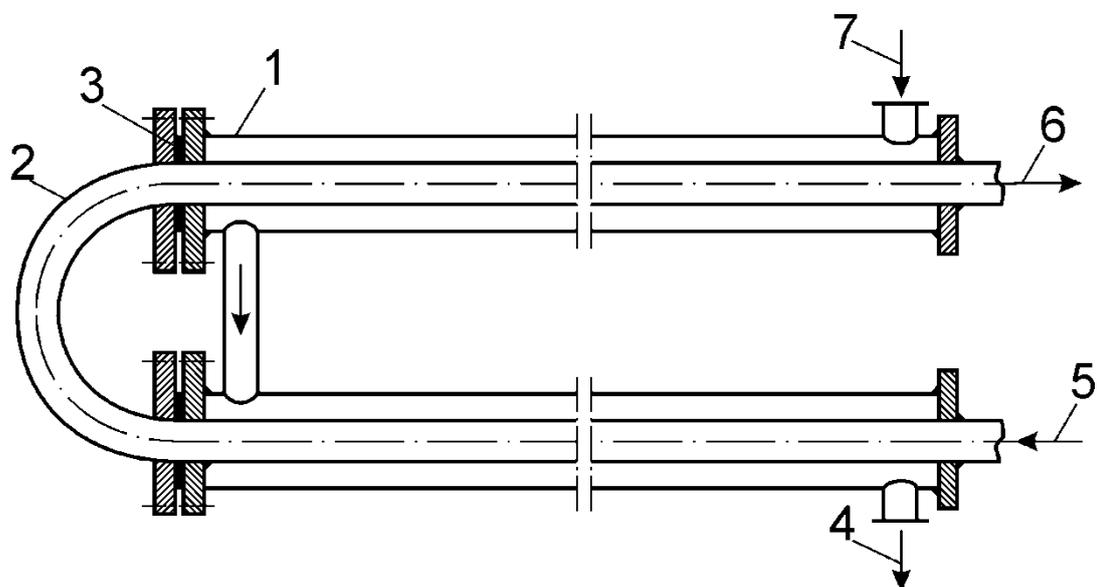


Рис. 1. Теплообменник типа «труба в трубе»

Таблица 1. Теплообменные аппараты типа «труба в трубе»

Основные параметры	Аппараты				
	Разборные одно- и двухпоточные малогабаритные	неразборные однопоточные малогабаритные	разборные однопоточные	неразборные однопоточные	разборные многопоточные
Наружный диаметр теплообменных труб, мм	25; 38	48; 57	75; 89	108; 133; 159	38; 48; 57
Наружный диаметр кожуховых труб, мм	57; 76	89; 108	108; 133	159; 219	89; 108
Длина кожуховых труб, м	1,5; 3,0	6,0; 4,5	4,5; 6,0; 9,0	6,0; 9,0; 12,0	3,0; 6,0; 9,0
Поверхность теплообмена, м ²	0,5 – 5,0	0,1 – 1,0	5,0 – 18,0	1,5 – 6,0	5,0 – 93,0
Проходные сечения, м ² · 10 ⁴ :					
<i>внутри теплообменных труб</i>	2,5 – 35,0	2,5 – 17,5	50 -170	45 - 170	35 - 400
<i>снаружи теплообменных труб</i>	5,0 - 100	6 - 50	50 -195	50 - 195	150 - 1000
Условное давление, МПа:					
<i>внутри теплообменных труб</i>	6,4; 10,0; 16,0	6,4; 10,0; 16,0	1,6; 4,0	1,6; 4,0; 6,4; 10,0; 16,0	1,6; 4,0
<i>снаружи теплообменных труб</i>	1,6; 4,0; 6,4	1,6; 4,0; 6,4; 10,0	1,6 4,0	1,6; 4,0; 6,4; 10,0	1,6; 4,0

Лабораторная работа

Исследование тепловых характеристик жидкостно-жидкостного аппарата типа «труба в трубе»

Целью лабораторной работы является:

- углубление студентами знаний по теории конвективного теплообмена в условиях вынужденного движения жидкости в трубе, изучение методики экспериментального определения коэффициента теплопередачи и его зависимости от факторов, определяющих процесс теплообмена;
- приобретение студентами навыков самостоятельного проведения экспериментальных исследований, обработки опытных данных и анализа полученных результатов.

Схема и описание экспериментальной установки

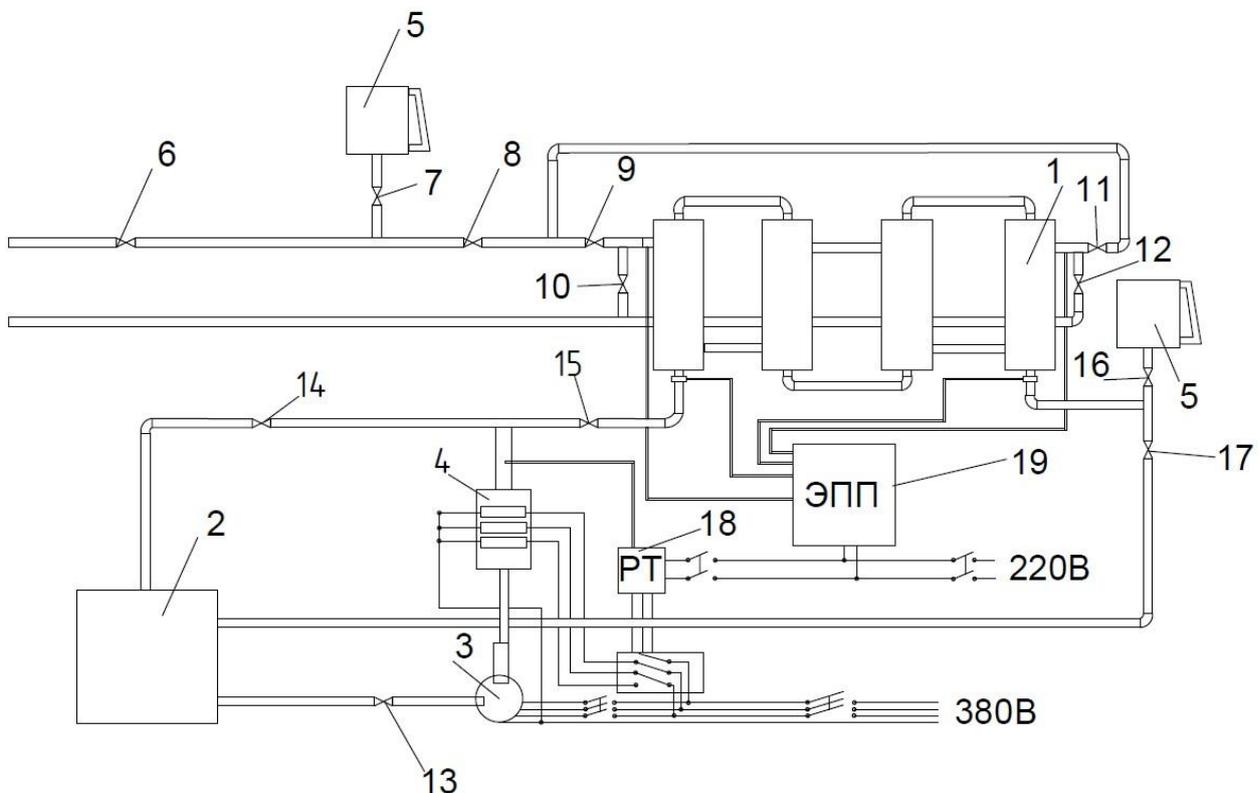


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки

Установка состоит из контуров греющего и нагреваемого теплоносителей, на которых смонтирован теплообменный аппарат 1 с *противоточной* либо *прямоточной* схемой движения сред. Кроме контуров и теплообменника, установка включает в себя: бак горячего теплоносителя 2, циркуляционный насос 3, электроподогреватель 4, расходомерные бачки 5, вентили 6÷17, регулятор температуры 18 и самопишущий потенциометр (типа ЭПП-09)19.

В качестве нагреваемого теплоносителя используется холодная вода из водопровода. Греющий теплоноситель подаётся циркуляционным насосом 3 из бака 2. Питание насоса осуществляется от сети переменного тока напряжением 380 В.

Подогрев греющего теплоносителя осуществляется электрическим нагревателем 4, установленным за насосом 3. Электронагреватель состоит из трёх теплоэлектронагревателей (ТЭН). Регулятор температуры греющего теплоносителя обозначен на схеме 18.

Расход нагреваемого и греющего теплоносителей осуществляется соответственно вентилями 6, 14, 15, установленными на входе рабочих сред в теплообменник.

Для измерения расхода теплоносителей предусмотрены расходомерные бачки 5. Измерение температуры нагреваемой и греющей сред производится самопишущим потенциометром 19 типа ЭПП-09.

Некоторые конструктивные характеристики теплообменника приведены в табл. 2.

Таблица 2. Конструктивные характеристики теплообменного аппарата

Характеристика	Внутренняя труба	Наружная труба
Диаметр, мм	28 x 2	57 x 3
Длина, мм	550	550
Проходное сечение, м ²	$4,52 \cdot 10^{-4}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$
Эквивалентный диаметр, мм	24	27
Поверхность теплообменного аппарата, м ²	0,18	

Подготовка к проведению опытов и методика измерений

Перед началом работы необходимо тщательно ознакомиться с опытной установкой, проверить правильность включения измерительных приборов. Вентили 7,13,14,16 должны находиться в открытом положении. Вентили 8,15,17 – в закрытом. Пуск установки в работу и изменение режимов осуществляется под наблюдением преподавателя.

Перед включением электрооборудования необходимо проверить исправность электрической схемы. После этого включается регулятор температуры 18 и потенциометр 1 в сеть напряжением 220 В.

Затем, предварительно убедившись, что вентили 13 и 14 находятся в открытом положении, включают рубильник на распределительном щите.

Внимание! Необходимо помнить, что при включении рубильника автоматически производится пуск электронагревателя 4. Поэтому с целью предотвращения выхода его из строя необходимо одновременно обеспечить пуск электродвигателя 3.

В зависимости от положения вентиля 9, 10, 11 и 12 обеспечивается работа теплообменника 1 по прямоточной или противоточной схеме течения теплоносителя.

При выполнении лабораторной работы № 1 проводится исследование тепловых характеристик жидкостно-жидкостного аппарата типа «труба в трубе», работающего по *прямоточной* схеме течения теплоносителей. При этом вентили 9 и 12 должны быть открыты, а вентили 10 и 11 – закрыты.

При выполнении лабораторной работы № 2 аппарат работает по *противоточной* схеме течения теплоносителей. При этом вентили 9 и 12 находятся в закрытом положении, а вентили 10 и 11 – в открытом.

При заданных расходах теплоносителей добиваются установившегося теплового состояния (стационарного режима), которое контролируется температурой воды на выходе из теплообменного аппарата.

Изменение расхода нагреваемого теплоносителя регулируется степенью открытия вентиля 14 и 15. По достижении установившегося

теплового режима производят необходимые измерения, результаты которых записываются в журнал наблюдений(табл. 3).

Таблица 3. Журнал наблюдений

№ п/п	Греющий теплоноситель			Нагреваемый теплоноситель		
	расход	температура, °С		расход	температура, °С	
	G_1 , кг/с	вход, t_1'	выход, t_1''	G_2 , кг/с	вход, t_2'	выход, t_2''
1						
2						
3						
...						

Затем меняется расход греющего теплоносителя и (с помощью регулятора температуры 13) температура воды на входе в теплообменник.

Опыты следует проводить при 3÷4 различных тепловых режимах работы теплообменного аппарата, которые характеризуются постоянным расходом греющего теплоносителя. При этом рекомендуется провести измерения при 7÷10 расходах нагреваемого теплоносителя.

При измерении расхода нагреваемого теплоносителя вентиль 8 должен находиться в закрытом положении, вентиль 7 – в открытом. Расход теплоносителя определяется по скорости заполнения расходомерного бачка 5. Цена деления его водомерного стекла – 0,5 л. После проведения измерения расхода нагреваемого теплоносителя положение вентиля 7 и 8 меняют на противоположное: вентиль 7 закрывают, вентиль 8 открывают. Расход греющего теплоносителя определяется аналогично нагреваемому с помощью мерного бачка 5 и вентиля 16 и 17.

Температура холодного и горячего теплоносителя на входе и выходе из теплообменного аппарата измеряется хромель-копелевыми термопарами, установленными в центрах по течению каналов. Величина электродвижущей силы измеряется показывающим самопишущим потенциометром 19 типа ЭПП – 09.

Методика обработки результатов эксперимента

Коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата по *опытным* данным определяется из уравнения теплопередачи:

$$k_{\text{оп}} = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{\text{ср}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

где Q – нагрузка теплообменного аппарата, Вт;

F – поверхность нагрева теплообменника, м^2 ;

$\Delta t_{\text{ср}}$ – среднелогарифмический температурный напор, °C .

Количество тепла, переданное от горячего теплоносителя к холодному, определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2'' - t_2') = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_1' - t_1'') - Q_{\text{пот}}, \text{ Вт},$$

где G_2 – расход нагреваемого теплоносителя, кг/с;

c_{p2} – теплоемкость нагреваемого теплоносителя, Дж/(кг· °C);

t_2'' – температура нагреваемого теплоносителя на выходе из аппарата, °C ;

t_2' – температура нагреваемого теплоносителя на входе в аппарат, °C ;

G_1 – расход греющего теплоносителя, кг/с;

c_{p1} – теплоемкость греющего теплоносителя, кДж/(кг· °C);

t_1' – температура греющего теплоносителя на выходе в аппарат, °C ;

t_1'' – температура греющего теплоносителя на выходе из аппарата, °C ;

$Q_{\text{пот}}$ – потери тепла в окружающую среду, Вт.

Долю потерь тепла в окружающую среду рассчитывают по уравнению:

$$m = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100 \%$$

Среднелогарифмический температурный напор

$$\Delta t = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}} \cdot \varepsilon_{\Delta t}$$

определяется в соответствии со схемами, приведёнными на рис. 3 и 4:

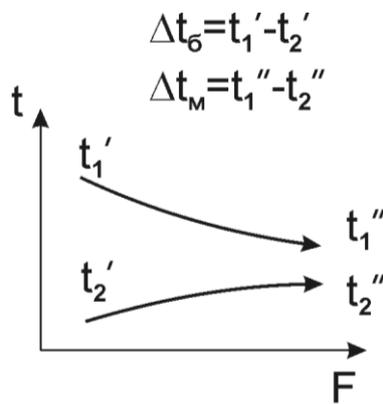


Рис. 3. Температурный напор при прямоточной схеме движения теплоносителей

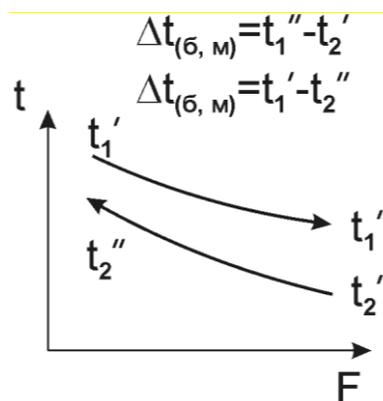


Рис. 4. Температурный напор при противоточной схеме движения теплоносителей

Здесь $\epsilon_{\Delta t} = f(P, R)$ – коэффициент, учитывающий схему движения теплоносителей – определяется согласно графику, приведенному на рис. 5;

Комплексы P и R рассчитываются по формулам:

$$P = \frac{\delta t_2}{\Delta t_6} ;$$

$$R = \frac{\delta t_1}{\delta t_2} = \frac{t_1' - t_1''}{t_2' - t_2''} ;$$

где $\delta t_2 = t_2'' - t_2'$ – перепад температуры по нагреваемому теплоносителю;

$\delta t_1 = t_1' - t_1''$ – перепад температуры по греющему теплоносителю.

Расчетный коэффициент теплопередачи определяется по формуле:

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1^p} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2^p}},$$

где α_1^p и α_2^p – расчётные коэффициенты теплоотдачи от греющего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю, соответственно, Вт/(м²·°C);

$\delta_{ст}$ – толщина стенки трубы, м;

$\lambda_{ст} = 52$ Вт/(м·°C) – коэффициент теплопроводности стальной стенки.

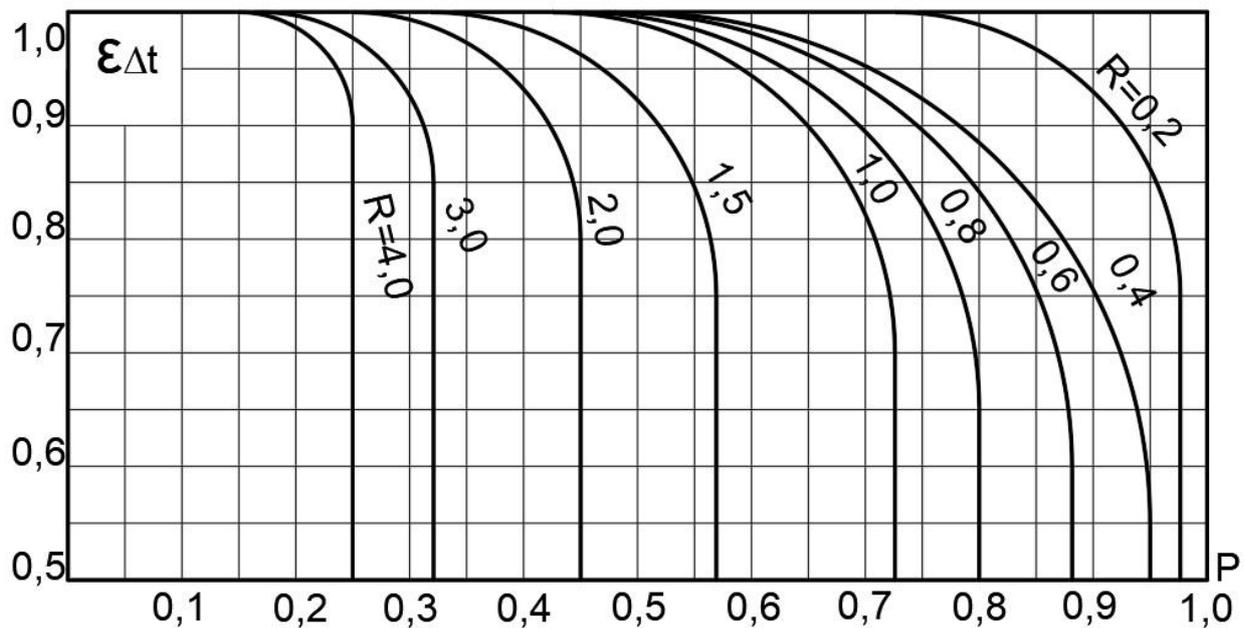


Рис. 5. Значения коэффициентов, учитывающих схемутечения теплоносителей

Коэффициент теплоотдачи α определяются в зависимости от режима течения теплоносителей, который характеризуется значением критерия Рейнольдса:

при $Re < 2300$

$$Nu_n = 0,17 \cdot Re_{\Pi}^{0,33} \cdot Gr_{\Pi}^{0,1} \cdot Pr_{\Pi}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{\Pi}}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \cdot \epsilon_1,$$

при $Re > 2300$

$$Nu_{\Pi} = 0,021 \cdot Re_{\Pi}^{0,8} \cdot Pr_{\Pi}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{\Pi}}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \cdot \epsilon_1,$$

$$\text{где } Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} ; Re = \frac{W \cdot l}{\nu} ; Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t ; Pr = \frac{\nu}{a} ;$$

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С);

l – определяющий размер, м;

λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·°С);

W – скорость потока, м, определяемая из уравнения расхода

$$G = \rho \cdot W \cdot f;$$

ρ – плотность, кг/м³;

f – проходное сечение, м²;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

$\beta = 1/(t_{п} + 273)$ – коэффициент объёмного расширения, 1/К;

Δt – температурный напор:

$\Delta t = t_{п1} - t_{ст}$ – для горячего (греющего) теплоносителя;

$\Delta t = t_{ст} - t_{п2}$ – для холодного (нагреваемого) теплоносителя;

$t_{п1}$ – средняя температура для горячего теплоносителя;

$t_{п2}$ – средняя температура для холодного теплоносителя;

$t_{ст} = 0,5 (t_{п1} + t_{п2})$ – температура стенки;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

ϵ_1 – поправка, учитывающая изменение коэффициента теплоотдачи по длине трубы, определяется по табл. 4.

Расчётный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha^p = \alpha \cdot \varphi ,$$

где $\varphi = 0,7 \div 0,9$ – коэффициент, учитывающий загрязнение труб.

Таблица 4. Поправки на длину трубы

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ϵ_1	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,00

Результаты расчёта сводятся в журнал (табл. 5). Опытные данные обрабатываются в критериальном виде. По результатам расчётов строится график зависимости $k_{оп} = f(k_p)$ (рис. 6).

Таблица 5. Результаты расчёта

№ п/п	G_1 , кг/с	Q_1 , Вт	G_2 , кг/с	Q_2 , Вт	$Q_{пот}$, Вт	m , %	$\Delta t_{ср}$, °C	$k_{оп}$, Вт/(м ² ·°C)
1								
2								
3								
...								

Продолжение табл. 5

№ п/п	W_1 , м/с	Re_1	Nu_1	α_1 , Вт/(м ² ·°C)	W_2 , м/с	Re_2	Nu_2	α_2 , Вт/(м ² ·°C)	k_p , Вт/(м ² ·°C)
1									
2									
3									
...									

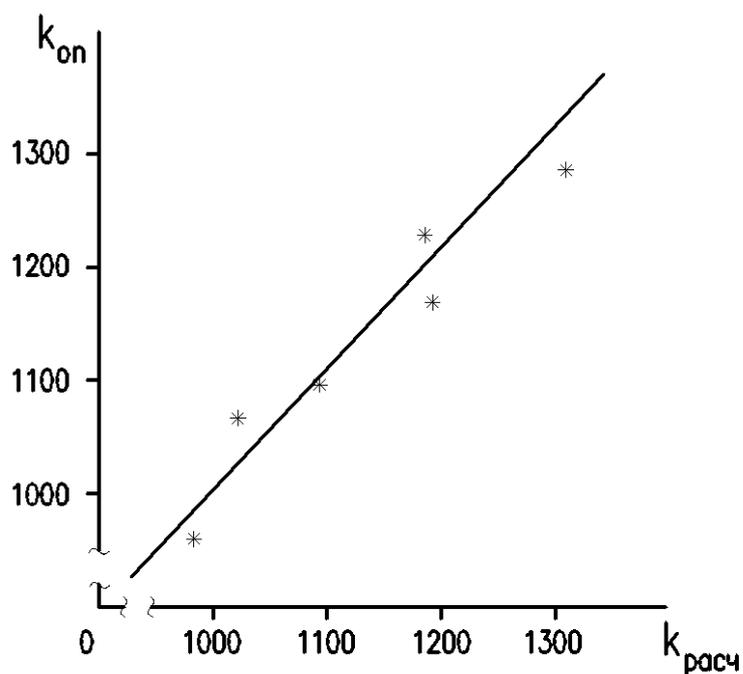


Рис. 6. Сравнение опытного и расчётного коэффициентов теплопередачи

Отчёт о лабораторной работе должен содержать:

- 1) краткое описание работы;
- 2) принципиальную схему установки;
- 3) протокол записи показаний измерительных приборов (журнал наблюдений);
- 4) график зависимости коэффициентов теплопередачи $k_{оп} = f(k_p)$;
- 5) сравнение полученных результатов с литературными данными.

Библиографический список

Готовский М.А., Суслов В.А. Теплообмен в технологических установках /СПбГУ Петра Великого, 2017.

Суслов В.А. Теплообмен. Ч.1.: учеб.пособие. –изд. 2-е, испр. и доп./ ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2016.

Суслов В.А., Белоусов В.Н., Антуфьев С.В. и др. Теплообменное оборудование ТЭС и АЭС: учеб.пособие /СПбГТУРП. - СПб., 2015.

Иванов А.Н., Белоусов В.Н., Смородин С.Н. Теплообменное оборудование предприятий: учеб.пособие/ ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2016.

Оглавление

Введение.....	3
Лабораторная работа. Исследование тепловых характеристик жидкостно-жидкостного аппарата типа «труба в трубе»	7
<i>Схема и описание экспериментальной установки</i>	7
<i>Подготовка к проведению опытов и методика измерений</i>	9
<i>Методика обработки результатов эксперимента</i>	11
Библиографический список.....	16

Учебно-методическое издание

Суслов Вячеслав Александрович
Белоусов Владимир Николаевич
Иванов Александр Николаевич
Антуфьев Сергей Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОСТНО-ЖИДКОСТНОГО
АППАРАТА
ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»**

Учебно-методическое пособие