

**С. В. Антуфьев
В. А. Суслов
А. Н. Иванов
К. Г. Мисютина
В. А. Рыжиков**

**ТЕПЛОМАССОБМЕННОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

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

Выполнение лабораторных работ

**Санкт-Петербург
2021**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра промышленной теплоэнергетики**

ТЕПЛОМАССОБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

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

Выполнение лабораторных работ

Методические указания для студентов всех форм обучения
по направлению подготовки
13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

Составители:
С. В. Антуфьев
В. А. Суслов
А. Н. Иванов
К. Г. Мисютина
В. А. Рыжиков

Санкт-Петербург
2021

Утверждено
на заседании кафедры ПТЭ
29.09.2021 г., протокол № 2

Рецензент В. Г. Злобин

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплины «Тепломассообменное оборудование теплоэнергетических предприятий (ТМОТЭП)» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». В указаниях представлен порядок выполнения и оформления лабораторной работы, рассмотрено описание лабораторной установки, правила работы с ней, даны рекомендации по выполнению лабораторных работ и методика обработки результатов экспериментов.

Методические указания сопровождаются иллюстрациями и принципиальными схемами для лучшего понимания назначения и устройства оборудования.

Методические указания предназначены для бакалавров очной и заочной форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве
методических указаний

Редактор и корректор А. А. Чернышева
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2021 г., поз. 5279

Подписано к печати 24.12.21.	Формат 60x84/16.	Бумага тип № 1.
Печать офсетная.	Печ.л. 1.	Уч.-изд. л. 1.
Тираж 50 экз.	Изд. № 5279.	Цена «С». Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

Содержание

Введение	4
Лабораторная работа. Исследование тепловых характеристик жидкостно-жидкостного аппарата типа «труба в трубе».....	5
Схема и описание лабораторной установки.....	5
Порядок выполнения работы	7
Методика обработки результатов эксперимента	8
Приложение	12
Библиографический список.....	13

Введение

Теплообменные аппараты – устройства, в которых осуществляется передача теплоты от одной рабочей среды к другой. В качестве рабочих сред в теплообменных аппаратах могут использоваться жидкие и газообразные вещества. Передача теплоты от одной среды к другой в теплообменных аппаратах может осуществляться через разделяющую их поверхность нагрева или при непосредственном контакте рабочих сред в теплообменном аппарате. В первом случае теплообменные аппараты называются рекуперативными. К ним относятся: воздухоподогреватели, пароперегреватели, экономайзеры, бойлеры и т. д. Во втором случае теплообменные аппараты называются смесительными. К ним относятся – деаэраторы, скрубберы, градирни и т. д.

Существуют еще теплообменные аппараты регенеративного типа. В аппаратах этого типа греющая и нагреваемая среда движутся по одним и тем же каналам. Тепло горячего теплоносителя отдается твердому телу – насадке. Затем холодный теплоноситель, омывая нагретую насадку, забирает от нее тепло.

В данной лабораторной работе исследуется жидкостно-жидкостные теплообменные аппараты рекуперативного типа с различными схемами движения рабочих сред.

Оценка тепловой эффективности теплообменных аппаратов производится по величине коэффициента теплопередачи $12 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$.

На интенсивность процесса теплообмена в теплообменных аппаратах оказывают влияние физические свойства рабочих сред (вязкость, плотность, теплопроводность, теплоемкость), режим движения, скорость, направление движения рабочих сред относительно друг друга (прямоток, противоток, перекрестный ток и т. д.), равномерность распределения потоков рабочих сред по сечению каналов, загрязнение поверхности нагрева и т. д.

Формула для определения количества теплоты, передаваемой от одного рабочего тела к другому в теплообменном аппарате, имеет вид:

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

где k – коэффициент теплопередачи, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$; F – поверхность теплообмена, $м^2$; Δt – температурный напор, $^\circ C$; Q – величина теплового потока, Вт.

Используя эту формулу, можно определить величину коэффициента теплопередачи k .

Лабораторные работы преследуют следующие цели:

1. Углубление студентами знаний по теории конвективного теплообмена при вынужденном движении потока в каналах различного вида.
2. Изучение принципов работы теплообменных аппаратов различного типа.
3. Закрепление знаний о физической сущности переноса теплоты от одного теплоносителя и влияния различных факторов на этот процесс.
4. Определение коэффициентов теплопередачи в рекуперативных теплообменниках при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей.

Лабораторная работа

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

Схема и описание лабораторной установки

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1:

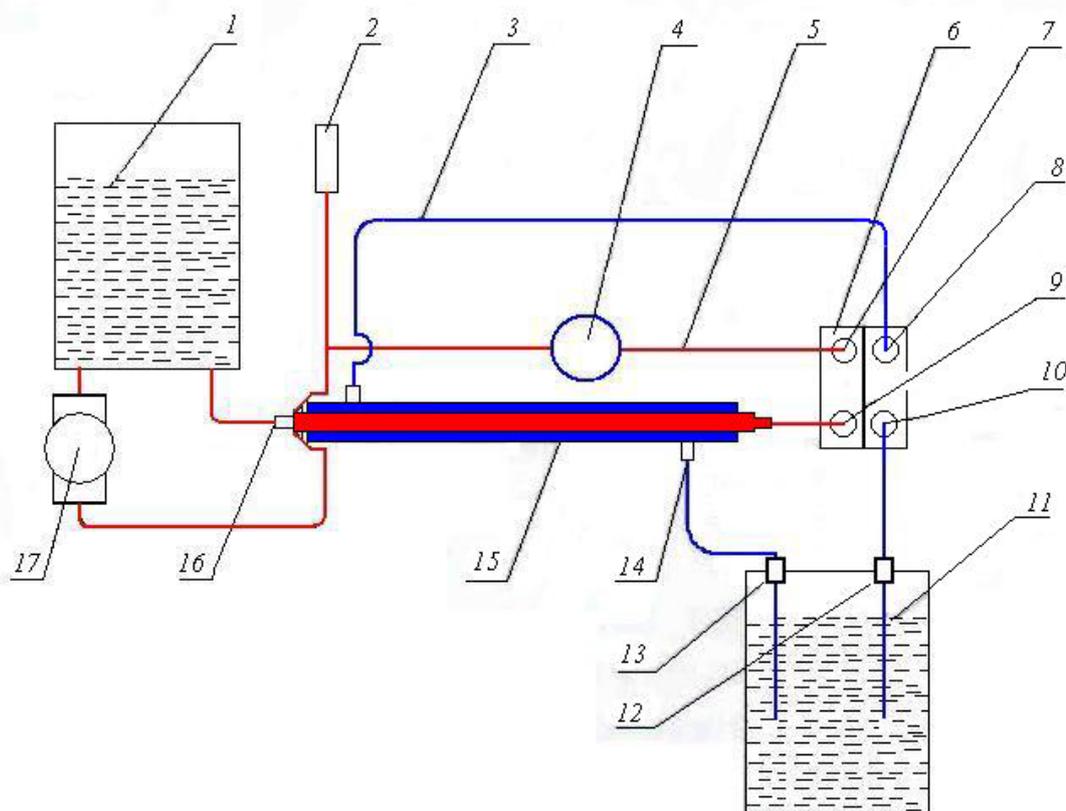


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – подогреватель воды; 2 – заливочное устройство; 3 – холодный контур; 4 – счетчик расхода горячего теплоносителя; 5 – горячий контур; 6 – пластинчатый теплообменник; 7 – датчик температуры горячего теплоносителя; 8 – датчик температуры холодного теплоносителя; 9 – датчик температуры горячего теплоносителя на входе в пт; 10 – датчик температуры холодного теплоносителя; 11 – резервуар холодного теплоносителя; 12 – насос подачи холодного теплоносителя прямотоком; 13 – насос подачи холодного теплоносителя противотоком; 14 – датчик температуры холодного теплоносителя; 15 – теплообменник «труба в трубе»; 16 – датчик температуры горячего теплоносителя на входе в теплообменник «труба в трубе»; 17 – насос подачи горячего теплоносителя в контур циркуляции.

Основными элементами экспериментальной установки являются два теплообменных жидкостно-жидкостных теплообменных аппаратах: пластинчатый и аппарат типа «труба в трубе». Установка состоит из контуров горячего и холодного теплоносителей. В качестве горячего и холодного теплоносителей используется вода. Направление движения горячего теплоносителя во всех экспериментах остается постоянным. Холодный теплоноситель может менять направление движения. Таким образом реализуется прямоточная и противоточная схема движения теплоносителей в теплообменных аппаратах.

Подогрев горячего теплоносителя осуществляется водонагревателем 1. Циркуляционный насос 17 направляет горячий теплоноситель на вход теплообменника 15 типа «труба в трубе», а затем горячий теплоноситель поступает на вход в пластинчатый теплообменник 6. После теплообменника 6 горячий теплоноситель возвращается циркуляционным насосом 17 в водонагреватель 1.

Температура горячего теплоносителя T_1 на входе в теплообменник типа «труба в трубе» измеряется датчиком 16, а температура на выходе T_2 датчиком 9. Температура горячего теплоносителя T_2 на входе в пластинчатый теплообменник измеряется датчиком 9, а температура на выходе T_3 датчиком 7.

Расход горячего теплоносителя измеряется счетчиком 4. Изменять расход теплоносителя можно с помощью переключателя на корпусе насоса.

Холодный теплоноситель хранится в резервуаре 11. Для организации прямоточного движения холодного теплоносителя используется насос 12, а для противоточного движения насос 13.

Насос 12 забирает холодный теплоноситель из резервуара 11 и направляет на вход в пластинчатый теплообменник 6. Затем холодный теплоноситель поступает на вход в теплообменник типа «труба в трубе» 15. После теплообменника 15 холодный теплоноситель возвращается в резервуар 11.

Для организации противоточной схемы движения используют насос 13.

Холодная вода забирается из резервуара 11 и последовательно проходит теплообменники 15 и 6. После чего возвращается в резервуар 11.

При прямотоке температура холодного теплоносителя T_4 на входе в пластинчатый теплообменник 6 измеряется датчиком 10, а температура на выходе из него T_5 измеряется датчиком 8. Температура T_5 на входе в теплообменник «труба в трубе» измеряется датчиком 8, а температура на выходе из него измеряется датчиком 14.

При противотоке температура холодного теплоносителя T_6 на входе в теплообменник «труба в трубе» 15 измеряется датчиком 14, а температура T_5 на выходе из него датчиком 8.

Температура T_5 на входе в пластинчатый теплообменник измеряется датчиком 8, а температура T_4 на выходе из него датчиком 10.

Расход холодного теплоносителя при всех режимах для прямотока и противотока одинаков и равен 5,4 л/мин.

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки и расположением приборов. Составить ее описание и заготовить таблицы 2 и 3 для регистрации результатов испытаний.

2. Подготовить установку к испытаниям теплообменников. Удостовериться, что уровень воды наблюдается в заливочном устройстве и ниже его середины, в противном случае долить жидкость в систему. В системе не допускаются подтеки.

3. Подключить стенд к сети 220 В.

4. Подключить автоматизированный стенд к USB разьему компьютера и запустить программу Пуск → Программы → MeasLAB → «Испытание теплообменников».

5. Включить питание стенда кнопкой «Сеть».

6. Включить насос ВК2 и водонагреватель кнопкой «ВК1». Установить режим малого нагрева – на лицевой части нагревателя должна быть включена левая клавиша, правая должна быть выключена.

7. При включении компьютерной системы измерения клавишей «Пуск» в программе на цифровых индикаторах лицевой панели отображаются мгновенные значения температур, измеряемых всеми датчиками, и графики их измерения по времени.

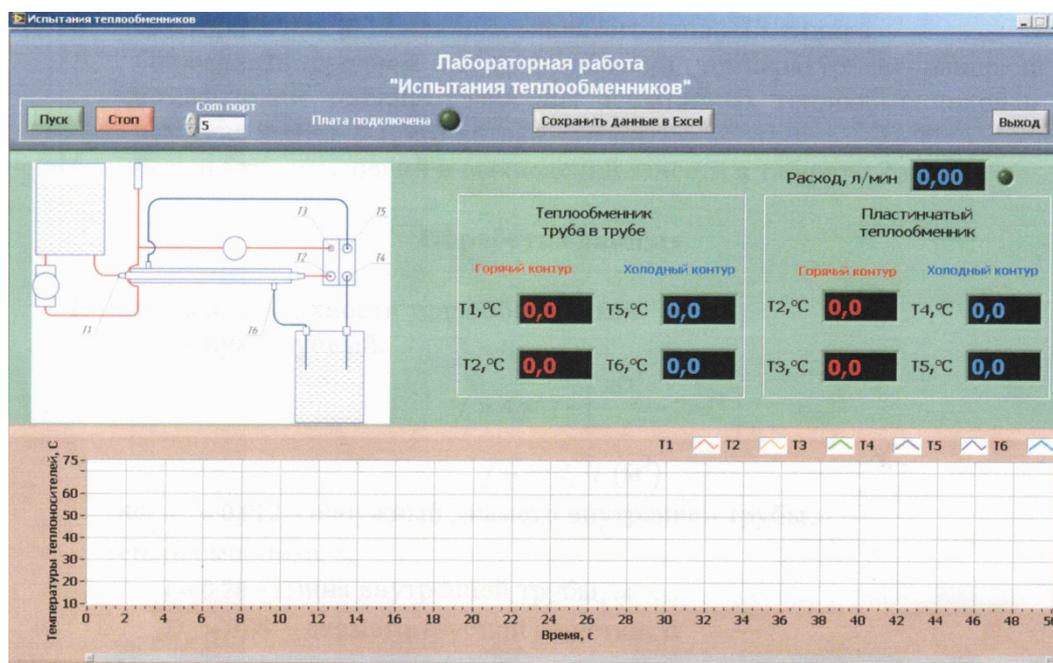


Рис. 2. Лицевая панель компьютерной системы измерения

8. После выхода на постоянный режим 50 – 60 °С включить подачу холодного теплоносителя с помощью выключателя тумблера на панели управления стендом (положение вверх режим прямотока, положение вниз – противотока).

9. Расход в систем горячего теплоносителя измеряется импульсным расходомером и его значение обновляется на соответствующем индикаторе в программе каждый раз, как через него прошел 1 л жидкости. Значение расхода в таблицу стоит вносить после установившегося значения расхода на дисплее.

10. При установлении стационарного теплового режима занести результаты измерений в таблицы 1 и 2.

11. Через 10 – 15 минут изменить направление подачи холодного теплоносителя (положение тумблера вниз) и повторить эксперимент.

12. Изменить расход в системе горячего контура можно с помощью переключателя на корпусе насоса, а увеличить температуру с помощью включения второго тэна (правая клавиша на корпусе нагревателя). Будьте внимательны: температура в системе не должна превышать 70 °С.

13. Повторить п. п. 8 – 10 для нового режима расхода или уровня температуры горячего теплоносителя.

14. Повторить п. п. 8 – 12 для пластинчатого теплообменника.

15. Определить средний логарифмический температурный напор и коэффициент теплопередачи для испытанных теплообменников в режимах прямо- и противотока.

Методика обработки результатов эксперимента:

Для обработки результатов эксперимента используются только данные, полученные в установившемся режиме.

Коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата определяется по формуле:

$$k = \frac{Q}{F \Delta t}, \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ С},$$

где Q – нагрузка теплообменного аппарата; Вт; F – расчетная поверхность нагрева, м²; Δt – температурный напор, °С.

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

$$Q = G_x \cdot C_x \cdot (t_{2k} - t_{2н}) = G_2 \cdot C_2 \cdot (t_{1н} - t_{1к}) - Q_{ном},$$

где G_x, G_2 – массовые расходы холодного и горячего носителя, $\frac{кг}{с}$; C_x, C_2 – удельные теплоемкости холодного и горячего теплоносителя, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ С}$;

$t_{1н}, t_{1к}$ – начальная и конечная температура горячего теплоносителя, °С;

$t_{2н}, t_{2к}$ – начальная и конечная температура холодного теплоносителя, °С;

$Q_{ном}$ – потери тепла в окружающую среду, Вт.

Тепловую нагрузку теплообменного аппарата Q определяют по стороне холодного теплоносителя.

$$Q = G_x \cdot C_x \cdot (t_{2k} - t_{2н}).$$

Доля потери тепла в окружающую среду рассчитывается по уравнению:

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

Массовый расход горячего и холодного теплоносителя определяется по формулам:

$$\begin{aligned} G_2 &= M_2 \cdot \rho_2 \\ G_x &= M_x \cdot \rho_x, \end{aligned}$$

где M_2, M_x – объемные расходы горячего и холодного теплоносителя, $\frac{\text{л}}{\text{мин}}$; (M_2 – определяется по счетчику 4, $M_x = 5,4 \cdot \frac{\text{м}}{\text{мин}}$); ρ_2, ρ_x – плотности горячего и холодного теплоносителя, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Плотность горячего и холодного теплоносителя определяется по средней его температуре.

Определение температурного напора производится в зависимости от схемы движения теплоносителей.

Для прямоточной схемы

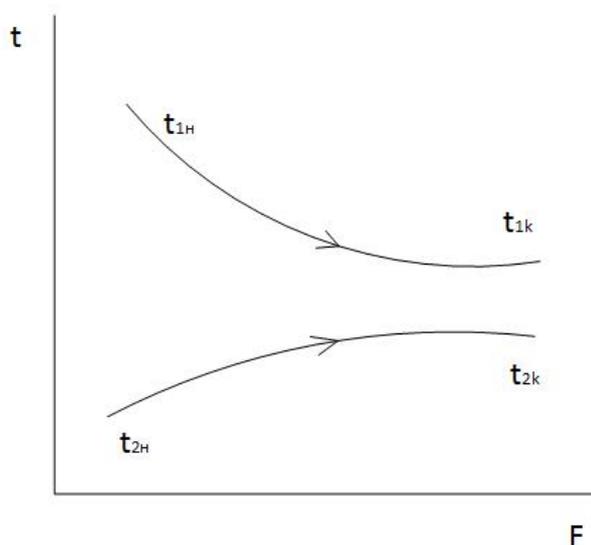


Рис. 3. Прямоточная схема движения теплоносителя

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_{\bar{m}}}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{o}}}{\Delta t_{\bar{m}}}},$$

где $\Delta t_{\bar{o}} = t_{1н} - t_{2н}$; $\Delta t_{\bar{m}} = t_{1к} - t_{2к}$.

Для противоточной схемы

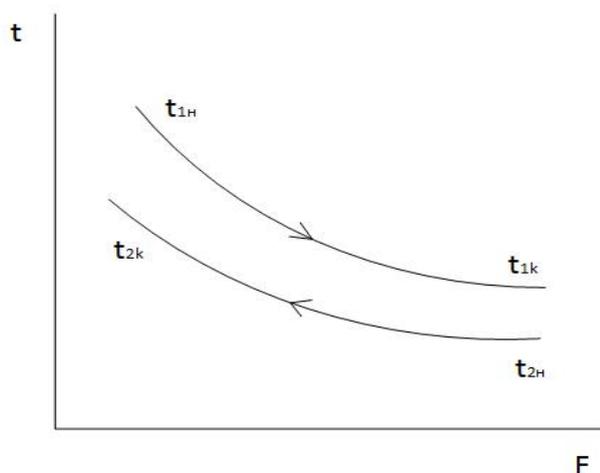


Рис. 4. Противоточная схема движения теплоносителя

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{m}}}$$

При такой схеме движения теплоносителей сначала определяют два температурных напора по формулам:

$$\Delta t_1 = t_{1n} - t_{2k}$$

$$\Delta t_2 = t_{1k} - t_{2n}$$

Выбирают из них наибольшее и наименьшее значение и подставляют в формулу для Δt_{cp} .

Все результаты измерений сводят в таблицы.

Таблица 1 – Прямоточная схема движения теплоносителя

№ п/п	«Труба в трубе»				Пластинчатый			Расход теплоносителя		
	T1	T2	T5	T6	T2	T3	T4	T5	M_2	M_x
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	л/мин	л/мин
1										
2										
3										

Таблица 2 – Противоточная схема движения теплоносителей

№ п/п	«Труба в трубе»				Пластинчатый				Расход теплоносителя	
	T1	T2	T6	T5	T2	T3	T5	T4	M_2	M_x
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	л/мин	л/мин
1										
2										
3										

Таблица 3 – Результаты вычислений испытания теплообменника
«Труба в трубе»

№ п/п	Прямоточная схема					Противоточная схема				
	Q_r	Q_x	m	Δt_{cp}	k	Q_r	Q_x	m	Δt_{cp}	k
	Вт	Вт	%	°C	$\frac{Вт}{м^2°C}$	Вт	Вт	%	°C	$\frac{Вт}{м^2°C}$

Таблица 4 – Результаты вычисления пластинчатого теплообменника

№ п/п	Прямоточная схема					Противоточная схема				
	Q_r	Q_x	m	Δt_{cp}	k	Q_r	Q_x	m	Δt_{cp}	k
	Вт	Вт	%	°C	$\frac{Вт}{м^2°C}$	Вт	Вт	%	°C	$\frac{Вт}{м^2°C}$
1										
2										
3										

Приложение

Физические параметры воды

t °C	ρ кг/м ³	C_p $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}^\circ\text{C}}$	$\mu \cdot 10^7$ Па°C	λ Вт/м°C	P_2
0	999,87	4217	17885	0,569	13,67
10	999,73	4192	12998	0,588	9,52
20	998,33	4182	10010	0,603	7,02
30	995,71	4180	7979	0,617	5,42
40	992,28	4178	6535	0,630	4,31
50	988,0	4181	5476	0,643	3,54
60	983,2	4184	4677	0,653	2,98
70	977,7	4190	4060	0,662	2,55
80	971,6	4196	3570	0,669	2,21
90	965,2	4206	3172	0,675	1,95
100	958,1	4216	2846	0,677	1,75

Библиографический список

1. Готовский М. А., Суслов В. А. Теплообмен в технологических установках. – СПб.: СПбГПУ Петра Великого, 2017. – 88 с.
2. Суслов, В. А. Тепломассообмен. – Ч.1: учеб. пособие. / В. А. Суслов. – Изд. 2-е, испр. и доп. – СПб.:ВШТЭ СПбГУПТД, 2016. – 133 с.
3. Суслов В. А., Белоусов В. Н., Антуфьев С. В. и др. Тепломассообменное оборудование ТЭС и АЭС: учеб. пособие. – СПб.: СПбГТУРП, 2015. – 123 с.
4. Иванов А. Н., Белоусов В. Н., Смородин С. Н. Тепломассообменное оборудование предприятий: учеб. пособие. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2016. – 184 с.