

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Кафедра теплоэнергетики

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛООБМЕННИКЕ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине
«Тепломассообмен» для студентов направления
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,
по дисциплине «Теплотехника» для студентов направления
23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин
и комплексов», профиль «Автомобили и автомобильное хозяйство»,
и специальности 21.05.04.00 «Горное дело», специализация 21.05.04.10
«Электрификация и автоматизация горного производства»,
всех форм обучения

Составители Е. Ю. Темникова
А. Р. Богомолов
С. А. Шевырев

Рассмотрены и утверждены
на заседании кафедры ТЭ
Протокол № 5 от 09.12.2015
Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления 23.03.03
Протокол № 5 от 09.12.2015
Электронная копия
находится в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2016

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является практическое изучение процессов теплообмена на действующей установке, экспериментальное исследование процесса теплопередачи и освоение методики расчета теплообменника «труба в трубе».

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Теплообменники типа «труба в трубе» широко используются в промышленности. Преимущество таких теплообменников заключается в разнообразии компоновок, они могут быть быстро собраны из стандартных элементов. При необходимости поверхность теплообмена может быть увеличена за счет установки дополнительных секций.

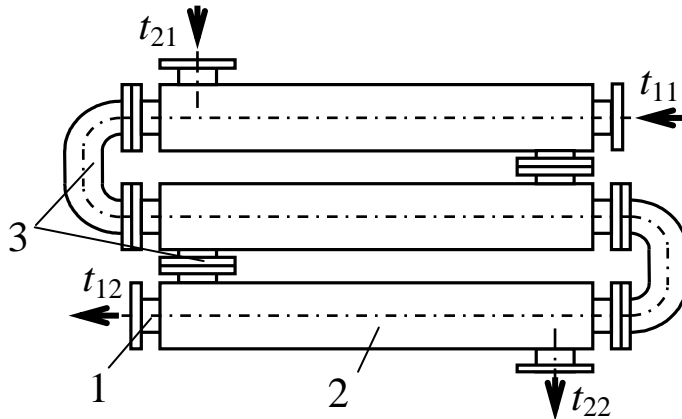


Рис. 1. Теплообменник «труба в трубе»:
1 – внутренняя труба; 2 – наружная труба; 3 – патрубки

Теплообменник «труба в трубе» (рис. 1) представляет собой трубу 1, концентрически размещенную в трубе 2 большего диаметра с патрубками 3 на концах для подвода теплоносителей от одной секции к другой.

Тепло передается от одного теплоносителя к другому через цилиндрическую стенку (рис. 2). Тепловой поток, переданный через стенку, прямо пропорционален движущей силе процесса – средней разности температур между теплоносителями и обратно пропорционален термическому сопротивлению теплопередачи:

$$Q = \frac{\Delta t F}{R} = k F \overline{\Delta t}, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток, Вт; $\overline{\Delta t}$ – средняя разность температур теплоносителей (температурный напор), °С; R – термическое сопротивление теплопередачи, м²·К/Вт; F – площадь передающей поверхности, м².

Термическое сопротивление теплопередачи складывается из термического сопротивления теплоотдачи от горячего теплоно-

сителя к стенке трубы, термического сопротивления стенки и термического сопротивления теплоотдачи от стенки трубы к холодному теплоносителю.

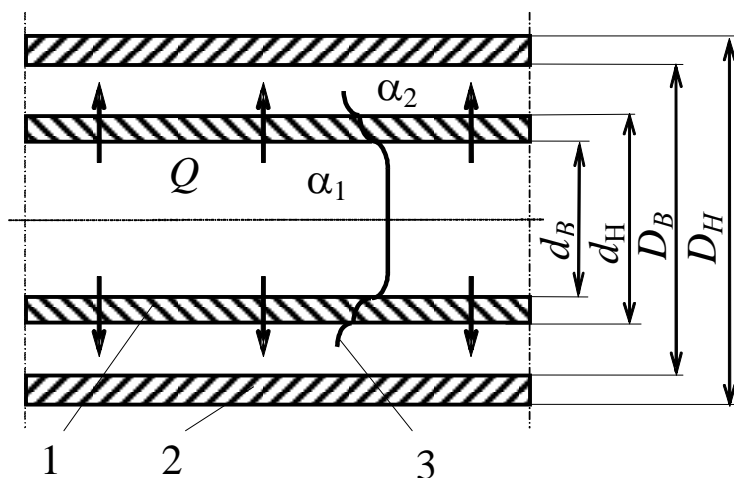


Рис. 2. Теплопередача через цилиндрическую стенку:
1 – внутренняя труба; 2 – кольцевой канал; 3 – профиль температуры

В случае цилиндрической стенки плотность теплового потока зависит от радиуса, поэтому при расчете термического сопротивления теплопередачи цилиндрической стенки плотность теплового потока относят к внутренней или наружной поверхности стенки. Термическое сопротивление теплопередачи цилиндрической стенки,

отнесенное к единице внутренней поверхности стенки, равно

$$R = R_{\alpha_1} + R_{\lambda} + R_{\alpha_2} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_B}{2\lambda_T} \ln \frac{d_H}{d_B} + \frac{d_B}{\alpha_2 d_H}, \quad (2)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя, протекающего во внутренней трубе, к внутренней поверхности трубы, Вт/(м²·К); α_2 – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы к теплоносителю, протекающему в кольцевом канале, Вт/(м²·К); λ_T – коэффициент теплопроводности материала внутренней трубы (для стали 46,5 Вт/(м·К)), Вт/(м·К); d_B , d_H – внутренний и наружный диаметры внутренней трубы, м.

Коэффициент k , обратный термическому сопротивлению теплопередачи, называется коэффициентом теплопередачи и рассчитывается по зависимости:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_B}{2\lambda_T} \ln \frac{d_H}{d_B} + \frac{d_B}{\alpha_2 d_H}}. \quad (3)$$

Средняя разность температур определяется как среднелогарифмическая:

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (4)$$

где Δt_{δ} – большая разность температур теплоносителей, °С; $\Delta t_{\text{м}}$ – меньшая разность температур теплоносителей, °С.

Коэффициент теплоотдачи α_1 **при развитом турбулентном течении** в трубах и каналах ($Re > 10^4$) равен

$$\alpha = 0,021 \frac{\lambda}{d} Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{см}}} \right)^{0,25}, \quad (5)$$

где $Re = \frac{\omega d \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса; $Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$ – критерий

Прандтля; ω – средняя скорость движения теплоносителя, м/с; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; λ – теплопроводность теплоносителя, Вт/(м·К); c_p – изобарная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К); μ – коэффициент динамической вязкости теплоносителя, Па·с; d – эквивалентный диаметр, для *трубы круглого сечения* равен внутреннему диаметру трубы $d_{\text{в}}$, для *кольцевого канала* $d = D_{\text{в}} - d_{\text{н}}$, м.

Определяющая температура – средняя температура теплоносителя. Расчет критерия $Pr_{\text{см}}$ производится при средней температуре стенки трубы.

При ламинарном и переходном режимах движения теплоносителя ($Re < 10^4$) необходимо учитывать влияние свободно-конвективного движения теплоносителя на теплоотдачу. Степень влияния свободной конвекции зависит от факторов: разности температур стенки и теплоносителя, коэффициента объемного расширения, скорости потока. Эти факторы учитываются комплексом критериев $GrPr$.

При значении комплекса $GrPr > 8 \cdot 10^5$ коэффициент теплоотдачи в горизонтальной гладкой трубе рассчитывают по формулам:

при $Re \leq 3500$:

$$\alpha = 0,8 \frac{\lambda}{d} \left(Re Pr \frac{d}{L} \right)^{0,4} (Gr Pr)^{0,1} \left(\frac{\mu}{\mu_{\text{см}}} \right)^{0,4}, \quad (6)$$

при $Re > 3500$:

$$\alpha = 0,022 \frac{\lambda}{d} Re^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{\mu}{\mu_{cm}} \right)^n, \quad (7)$$

где $Gr = \frac{gd^3\rho^2}{\mu^2} \beta \Delta t$ – критерий Грасгофа; β – коэффициент объемного расширения, $1/K$; $\Delta t = (\bar{t} - \bar{t}_{cm})$ – разность температуры теплоносителя и стенки, $^{\circ}C$; \bar{t} – средняя температура теплоносителя, $^{\circ}C$; \bar{t}_{cm} – средняя температура внутренней поверхности трубы (можно принять как среднеарифметическую между средними температурами горячего и холодного теплоносителя), $^{\circ}C$; L – длина трубы (теплопередающей ее части), м; $n = 0,11$ при нагревании теплоносителя; $n = 0,25$ при охлаждении теплоносителя.

При значении комплекса $GrPr \leq 8 \cdot 10^5$ коэффициент теплоотдачи определяется по зависимостям:

при $Re \leq 2300$:

$$\alpha = 1,55 \frac{\lambda}{d} \left(Re Pr \frac{d}{L} \right)^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_{cm}} \right)^{0,14}, \quad (8)$$

при $Re > 2300$:

$$\alpha = 0,008 \frac{\lambda}{d} Re^{0,9} Pr^{0,43}. \quad (9)$$

В формулах (6) – (9) определяющая температура – среднеарифметическая температура стенки и теплоносителя. Коэффициент динамической вязкости μ_{cm} находится при температуре стенки. Теплофизические свойства теплоносителей в зависимости от температуры приведены в справочной литературе [2–4].

Тепловой поток, отданный горячим теплоносителем, равен

$$Q_1 = c_{p1} G_1 |t_{11} - t_{12}|, \quad (10)$$

а полученный холодным теплоносителем

$$Q_2 = c_{p2} G_2 |t_{21} - t_{22}|, \quad (11)$$

где G_1, G_2 – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей соответственно, кг/с; t_{11}, t_{12} – температура на входе и выходе горячего теплоносителя, $^{\circ}C$; t_{21}, t_{22} – температура на входе и выходе холодного теплоносителя, $^{\circ}C$.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Схема лабораторной установки представлена на рис. 3. Теплообменник «труба в трубе» состоит из 4-х секций, расположенных горизонтально. Секции 1 состоят из наружной трубы большого диаметра 2, и внутри этой трубы проходит труба меньшего диаметра 3, по которой протекает горячая вода. Между наружной и внутренней трубами образуется кольцевой зазор 4, по которому протекает холодная вода (см. сечение А-А). Секции теплообменника соединяются коленами 5, выполненными без теплоизоляции.

В установку из системы холодного водоснабжения подается холодная вода (ХВ), из системы отопления – горячая (ГВ). Расход холодной воды регулируется вентилем 6, горячей – вентилем 7. Расходы холодной и горячей воды измеряются счетчиками 8 и 9.

Холодный поток воды поступает в теплообменник и движется по кольцевому зазору между наружной поверхностью трубы 3 и внутренней поверхностью наружной трубы 2 (см. сечение А-А), называемому межтрубное пространство. Направление движения холодной воды можно изменять вентилями 10, 11, 12, 13 блока управления режимами и схемами движения. Горячая вода подается в малую внутреннюю трубу и движется по трубному пространству. В процессе теплообмена холодная вода нагревается, а горячая охлаждается. Температуры холодного и горячего теплоносителей на входе и выходе теплообменника измеряют термометрами или термопарами, подключенными к показывающим измерителям-регуляторам фирмы «ОВЕН» 14, 15 – холодной воды; 16, 17 – горячей воды.

В табл. 1 представлены основные размеры теплообменного аппарата «труба в трубе».

В ходе выполнения лабораторной работы производят следующие измерения: расходы холодной и горячей воды с помощью счетчиков 8 и 9 за определенное время. Также измеряют температуры холодного и горячего теплоносителей на входе и выходе теплообменника термопарами. Измерения заносят в табл. 1 Приложения.

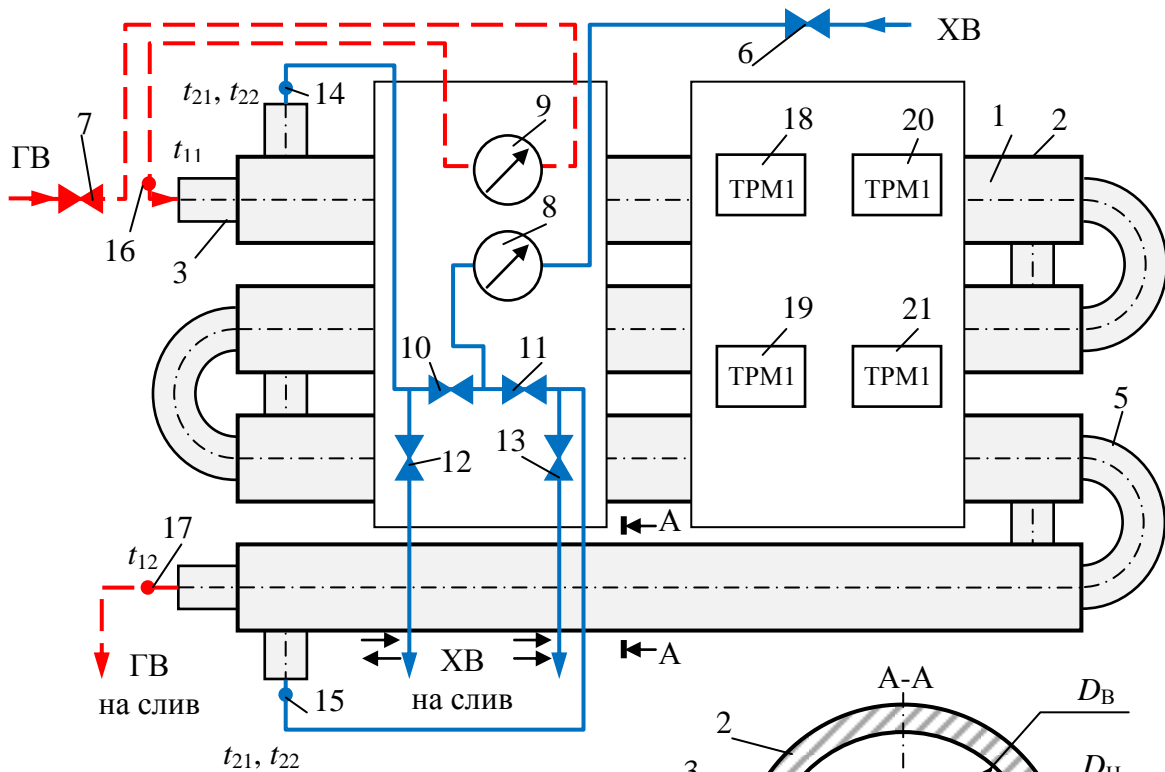


Рис. 3. Схема лабораторной установки «теплообменник «труба в трубе»:

1 – секция теплообменника; 2 – наружная труба; 3 – внутренняя труба; 4 – кольцевой зазор; 5 – соединительное колено; 6 – вентиль подачи; 7 – вентиль подачи горячей воды;

8, 9 – счетчики холодной и горячей воды; 10, 11, 12, 13 – вентили задания схемы движения (прямоток, противоток); 14, 15 – термометры холодной воды; 16, 17 – термометры горячей воды; 18 – измеритель регулятор холодной воды (вход – прямоток; выход – противоток); 19 – измеритель регулятор холодной воды (при прямотоке – на выходе; при противотоке – на входе); 20, 21 – измеритель регулятор горячей воды на входе и выходе; ГВ – горячая вода; ХВ – холодная вода

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Уточняем индексы у теплоносителей и место их движения (пространство теплообменного аппарата).

Индекс	Теплоноситель	Пространство теплообменника
1	горячая вода	трубное пространство
2	холодная вода	межтрубное пространство

2. По показаниям счетчиков определяют объемные расходы теплоносителей, м³/с,

$$V_1 = \frac{10^{-3} b_1}{\tau_1}; V_2 = \frac{10^{-3} b_2}{\tau_2}.$$

3. Из геометрических размеров теплообменника (табл. 1) рассчитывают площадь сечения каждого потока, м²,

$$S_1 = \frac{\pi d_B^2}{4}; S_2 = \frac{\pi(D_B^2 - d_H^2)}{4}.$$

Таблица 1

Наименование элемента	Размер
Наружная труба	
- наружный диаметр D_H , м	0,048
- внутренний диаметр D_B , м	0,040
- толщина стенки δ_H , м	0,004
- длина секции аппарата L_c , м	1,0
- общая длина аппарата $L_{ан}$, м	4,0
Внутренняя труба	
- наружный диаметр d_H , м	0,025
- внутренний диаметр d_B , м	0,020
- толщина стенки δ_B , м	0,0025

4. Вычисляют скорости движения теплоносителей, м/с,

$$\omega_1 = \frac{V_1}{S_1}; \omega_2 = \frac{V_2}{S_2}.$$

5. Находят определяющие температуры теплоносителей, °С,

$$t_{cp1} = \frac{t_{11} + t_{12}}{2}; t_{cp2} = \frac{t_{21} + t_{22}}{2}.$$

6. Массовые расходы рассчитывают через объемные, кг/с,

$$G_1 = V_1 \rho_1; G_2 = V_2 \rho_2,$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотность воды в зависимости от определяющей температуры берут из табл. 3 приложения, кг/м³.

Критерии Re_1 и Re_2 для теплоносителей во внутренней трубе и кольцевом канале теплообменника находят как

$$Re_1 = \frac{\omega_1 d_1 \rho_1}{\mu_1}; Re_2 = \frac{\omega_2 d_2 \rho_2}{\mu_2},$$

где μ_1 и μ_2 – динамический коэффициент вязкости в зависимости

от определяющей температуры (табл. 3 приложения), Па·с; определяющий размер – см. описание уравнения (3).

2. По значениям критерия Рейнольдса определяют режим движения теплоносителя (ламинарный, переходный, турбулентный) и рассчитывают коэффициенты теплоотдачи α_1 во внутренней трубе и α_2 в кольцевом канале по формулам (3) – (7). Все теплофизические свойства берут из табл. 3 приложения.

3. Вычисляют термическое сопротивление по уравнению (2) расчетный коэффициент теплопередачи k по формуле (3), среднюю разность температур по формуле (4).

4. По формуле (1) рассчитывают тепловой поток Q , переданный через стенку трубы от одного теплоносителя к другому. Вычисляют количества тепла Q_1 , отданное горячим теплоносителем, по формуле (10) и Q_2 , полученное холодным теплоносителем, по уравнению (11).

5. Полученные данные заносят в табл. 2 Приложения.

6. Выводы формулируются по значениям теплового потока Q , переданного через стенку трубы от одного теплоносителя к другому, количеству теплоты Q_1 , отданное горячим теплоносителем, и Q_2 , полученное холодным теплоносителем.

5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Запрещается:

1. Производить исправления в электросхеме, находящейся под напряжением.

2. Оставлять работающий лабораторный стенд, находящийся под напряжением без присмотра.

3. Работать с незаземленным оборудованием.

4. Касаться проводников, металлических клемм и других деталей, находящихся под электрическим напряжением.

5. Если возникло возгорание, следует немедленно обесточить лабораторную установку, вызвать пожарную команду и тушить огонь только углекислотным огнетушителем.

6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах бумаги формата А4 в соответствии со стандартами. Отчет должен содержать:

а) титульный лист установленной формы;

- б) краткое изложение теоретических положений;
- в) принципиальную схему установки;
- г) таблицы измеренных и рассчитанных величин;
- д) обработку результатов опыта;
- е) выводы.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расчет теплопередачи через цилиндрическую стенку при граничных условиях третьего рода.
2. Основные типы теплообменных аппаратов. Достоинства и недостатки теплообменника «труба в трубе».
3. Движущая сила процесса теплопередачи, термическое сопротивление процессу.
4. Расчет среднего температурного напора между теплоносителями при прямотоке, противотоке, перекрестном и смешанном токе.
5. Как выбирается определяющая температура, что такое определяющий размер? Определите эквивалентный диаметр в кольцевом канале.
6. Что является движущей силой при свободной конвекции?
7. Как влияют теплофизические свойства теплоносителей на теплопередачу?
8. Назовите основное уравнение теплопередачи, поясните. Дайте определение коэффициенту теплопередачи.
9. Смысл критерия Нуссельта.
10. Что характеризует критерий Прандтля?

8. ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: Альянс, 2005. – 753 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Измеряемые величины

Схема движения	Горячий теплоноситель				Холодный теплоноситель			
	$t_{11},$ °С	$t_{12},$ °С	показание счетчика $b_1,$ л	время $\tau_1,$ с	$t_{21},$ °С	$t_{22},$ °С	показание счетчика $b_2,$ л	время $\tau_2,$ с

Таблица 2

Расчетные величины

Горячий теплоноситель	Объемный расход $V_1, \text{ м}^3/\text{с}$	
	Площадь сечения потока $S_1, \text{ м}^2$	
	Определяющая температура $t_{cp1}, \text{ °С}$	
	Массовый расход $G_1, \text{ кг/с}$	
	Скорость потока $w_1, \text{ м/с}$	
	Критерий Рейнольдса Re_1	
	Коэффициент теплоотдачи $\alpha_1, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	
	Количество выделившейся теплоты $Q_1, \text{ Вт}$	
Холодный теплоноситель	Объемный расход $V_2, \text{ м}^3/\text{с}$	
	Площадь сечения потока $S_2, \text{ м}^2$	
	Определяющая температура $t_{cp2}, \text{ °С}$	
	Массовый расход $G_2, \text{ кг/с}$	
	Скорость потока $w_2, \text{ м/с}$	
	Критерий Рейнольдса Re_2	
	Коэффициент теплоотдачи $\alpha_2, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	
	Количество воспринятой теплоты $Q_2, \text{ Вт}$	
Коэффициент теплопередачи $k, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$		
Термическое сопротивление теплопередачи $R, (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$		
Средний температурный напор $\overline{\Delta t}, \text{ К}$		
Площадь поверхности теплообмена $F, \text{ м}^2$		
Тепловой поток, переданный через стенку, $Q, \text{ Вт}$		

Таблица 3

Теплофизические свойства воды в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\mu, \text{мПа}\cdot\text{с}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
0	999,8	1,792	4,217	0,5609	36	993,7	0,7085	4,179	0,6247
1	999,9	1,731	4,215	0,5628	38	993,0	0,6814	4,179	0,6277
2	999,9	1,673	4,212	0,5647	40	992,3	0,6560	4,179	0,6307
3	1000,0	1,619	4,210	0,5667	42	991,5	0,6321	4,179	0,6333
4	1000,0	1,567	4,207	0,5686	44	990,7	0,6097	4,180	0,6359
5	1000,0	1,519	4,205	0,5705	46	989,8	0,5883	4,180	0,6384
6	1000,0	1,473	4,202	0,5724	48	988,9	0,5683	4,181	0,6410
7	999,9	1,428	4,200	0,5743	50	988,0	0,5494	4,181	0,6436
8	999,9	1,386	4,197	0,5763	52	987,1	0,5315	4,182	0,6457
9	999,8	1,346	4,195	0,5782	54	986,2	0,5146	4,183	0,6479
10	999,7	1,308	4,192	0,5801	56	985,2	0,4985	4,183	0,6500
12	999,6	1,236	4,190	0,5838	58	984,2	0,4832	4,184	0,6522
14	999,3	1,171	4,188	0,5875	60	983,2	0,4688	4,185	0,6543
16	999,0	1,111	4,186	0,5911	62	982,1	0,4550	4,186	0,6560
18	998,7	1,056	4,184	0,5948	64	981,1	0,4418	4,187	0,6578
20	998,3	1,005	4,182	0,5985	66	979,9	0,4293	4,188	0,6595
22	997,8	0,9579	4,181	0,6019	68	978,8	0,4174	4,189	0,6613
24	997,4	0,9142	4,180	0,6053	70	977,7	0,4061	4,190	0,6630
26	996,8	0,8737	4,180	0,6088	72	976,5	0,3952	4,191	0,6644
28	996,3	0,8360	4,179	0,6122	74	975,3	0,3849	4,192	0,6657
30	995,7	0,8007	4,178	0,6156	76	974,1	0,3750	4,194	0,6671
32	995,1	0,7679	4,178	0,6186	78	972,9	0,3655	4,195	0,6684
34	994,4	0,7371	4,178	0,6216	80	971,6	0,3565	4,196	0,6698

Составители
Елена Юрьевна Темникова
Александр Романович Богомолов
Сергей Александрович Шевырев

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА
В ТЕПЛООБМЕННИКЕ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»**

«Тепломассообмен» для студентов направления
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,
по дисциплине «Теплотехника» для студентов направления
23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин
и комплексов», профиль «Автомобили и автомобильное хозяйство»,
и специальности 21.05.04.00 «Горное дело», специализация 21.05.04.10
«Электрификация и автоматизация горного производства»,
всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 29.02.2016. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 0,6.

Тираж 20 экз. Заказ

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.