

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В КОЖУХОТРУБЧАТОМ СТЕКЛЯННОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

В кожухотрубчатом теплообменном аппарате один теплоноситель движется внутри прямых параллельных труб, собранных в пучок и помещённых в кожух, т.е. движется в так называемом «трубном пространстве»; другой – омывает поверхность труб снаружи, перемещаясь в так называемом «межтрубном пространстве».

Перенос теплоты от более горячей жидкости к менее горячей в таком аппарате осуществляется через стенки теплообменных труб.

Интенсивность теплообмена между жидкостями определяется величиной коэффициента теплопередачи (K_T), который, согласно основному уравнению теплопередачи, равен:

$$K_{T \text{ эксп}} = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{\text{ср}} A}, \quad (8.1)$$

где $\dot{Q}$ – количество теплоты, передаваемой в единицу времени от одного теплоносителя к другому, или тепловой поток; $\Delta T_{\text{ср}}$ – средняя вдоль поверхности теплообмена разность температур теплоносителей; A – площадь поверхности теплообмена, вычисляемая обычно по наружному диаметру теплообменных труб.

При заданных расходах теплоносителей и известных физических свойствах потоков величина коэффициента теплопередачи может быть предсказана расчётом по уравнению аддитивности термических сопротивлений (без учёта термических сопротивлений загрязнений теплообменной поверхности):

$$K_{T \text{ расч}} = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \frac{d_{\text{н}}}{2\lambda_{\text{ст}}} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} \right)^{-1}, \quad (8.2)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ и $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициенты теплоотдачи с наружной и внутренней стороны теплообменных труб, соответственно; $d_{\text{н}}$ и $d_{\text{вн}}$ – диаметры наружный и

внутренний теплообменной трубы, соответственно; $\lambda_{\text{ст}}$ – теплопроводность материала теплообменной трубы (стенки).

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента теплопередачи в кожухотрубчатом стеклянном теплообменнике; сравнение полученного значения со значением, рассчитанным по уравнению аддитивности термических сопротивлений.

Описание установки

Схема лабораторной установки изображена на рис. 8.1.

Основным элементом установки является вертикальный стеклянный кожухотрубчатый теплообменник ТО, состоящий из 19 труб размером $\varnothing 13 \times 1,5$ мм, заключённых в кожух внутренним диаметром $D_{\text{вн}} = 106$ мм. Трубы размещены в шахматном порядке по вершинам равностороннего треугольника с шагом 22 мм. Длина теплообменного участка труб $L = 990$ мм. Боросиликатное стекло, из которого выполнены трубы аппарата, имеет теплопроводность $\lambda_{\text{ст}} = 1,14$ Вт/(м·К).

В межтрубном пространстве аппарата расположено 5 сегментных перегородок на расстоянии 160 мм друг от друга.

Теплообмен в аппарате осуществляется между горячей водой и холодной водой.

Горячая вода поступает в трубное пространство теплообменника из автономной системы горячего водоснабжения. Её расход регулируется вентилем V_1 и измеряется ротаметром (поз. 1).

Холодная вода поступает в межтрубное пространство теплообменника из водопровода. Её расход регулируется вентилем V_2 и измеряется ротаметром (поз. 2).

Расходы воды через указанные ротаметры определяются по шкалам, нанесённым на стеклянные трубки приборов и имеющих градуировку в «л/мин» («LPM»).

Система кранов K_3 – K_6 позволяет организовывать либо прямоточное, либо противоточное движение теплоносителей в аппарате.

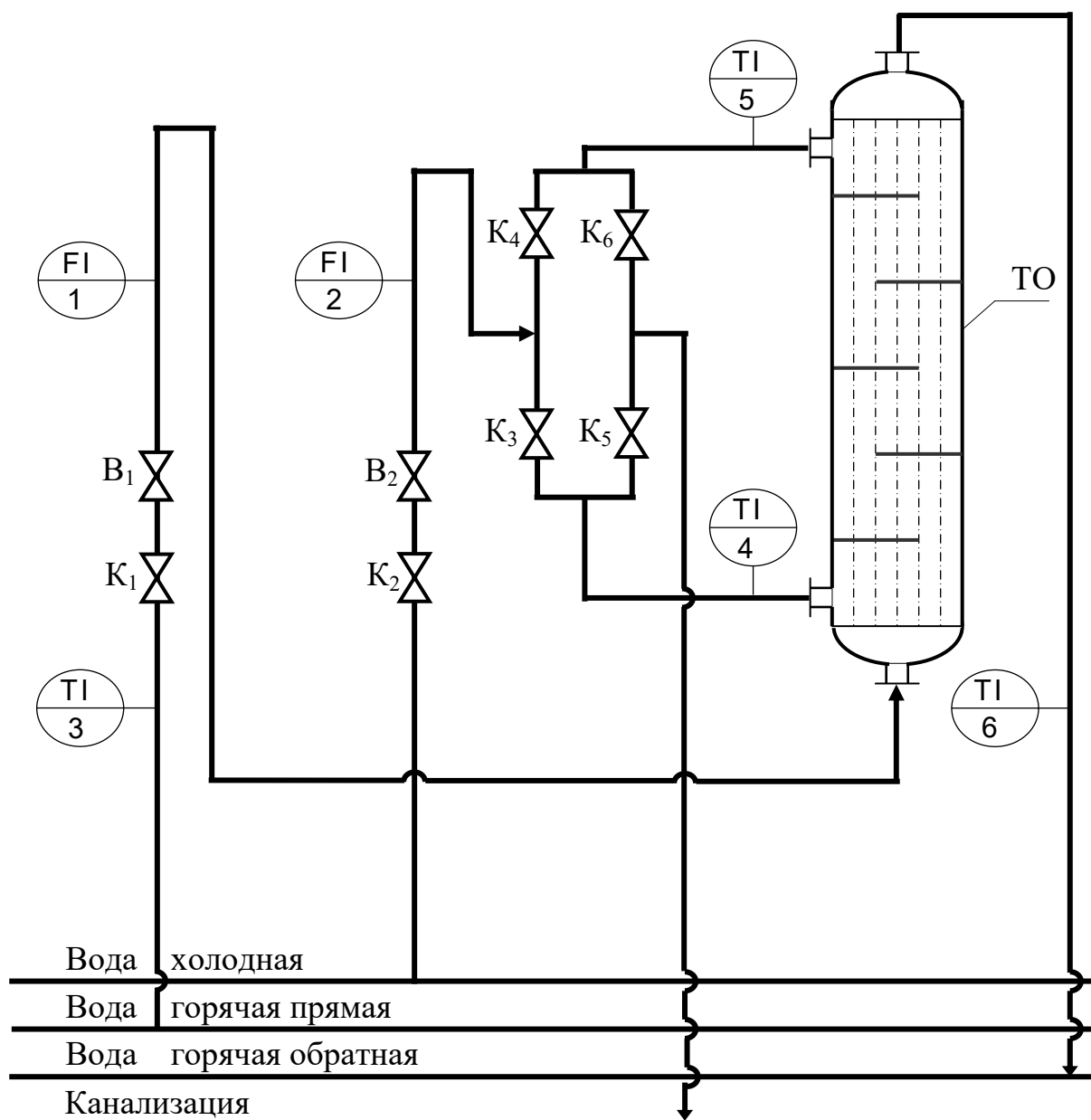


Рис. 8.1. Схема лабораторной установки для определения коэффициента теплопередачи в кожухотрубчатом стеклянном теплообменнике [7, 9]

Температуры теплоносителей на входе в теплообменник и на выходе из него измеряются электронными термометрами (поз. 3–6).

Методика выполнения работы

Перед подачей теплоносителей в аппарат необходимо открыть/закрыть каждый из кранов K_3 – K_6 в зависимости от заданного взаимного направления движения теплоносителей.

При прямотоке жидкостей холодная вода должна поступить в аппарат через нижний штуцер и выйти из аппарата через верхний. Следовательно, необходимо открыть краны K_3 и K_6 и закрыть краны K_4 и K_5 .

При противотоке жидкостей холодная вода должна поступить в аппарат через верхний штуцер и выйти из аппарата через нижний. Следовательно, необходимо открыть краны K_4 и K_5 и закрыть краны K_3 и K_6 .

Также необходимо убедиться, что кран K_1 на линии подачи горячей воды закрыт.

Далее рекомендуется выполнить следующие действия:

1. Включите электронные термометры (поз. 3–6).
2. Включите насос подачи горячей воды из автономной системы горячего водоснабжения на установку.

3. Откройте кран K_1 . С помощью вентиля B_1 установите по ротаметру заданный расход горячей воды. Расход жидкости определяют по отметке шкалы, соответствующей ребру на поплавке ротаметра.

4. Отслеживайте показания термометров (поз. 3) и (поз. 6). На стадии пуска установки значения температуры воды, измеряемые этими приборами, будут увеличиваться от комнатной температуры до температуры в системе горячего водоснабжения. Следует дождаться момента стабилизации обеих температур во времени.

5. Откройте кран K_2 . С помощью вентиля B_2 установите по ротаметру (поз. 2) заданный расход холодной воды.

6. Отслеживайте показания электронных термометров для каждой соответствующей точки контроля на установке.

Дождитесь стационарного режима теплообмена, характеризуемого постоянством во времени каждой фиксируемой температуры.

Отметьте расходы и температуры теплоносителей при стационарном теплообмене.

7. Закончив опыт, выключите насос, закройте вентиль B_1 и кран K_1 , а спустя 1–2 мин закройте вентиль B_2 и кран K_2 .

Обработка экспериментальных данных

1. Рассчитайте экспериментальное значение коэффициента теплопе-

редачи ($K_{\text{Т эксп}}$), отнесённого к единице площади *наружной* поверхности теплообменных труб, используя формулу (8.1).

Для этого необходимо в первую очередь рассчитать тепловой поток в аппарате. Количество теплоты, отдаваемой в единицу времени горячим теплоносителем, определяется по формуле:

$$\dot{Q}_1 = (h_{1\text{н}} - h_{1\text{к}}) \dot{m}_1 = (h_{1\text{н}} - h_{1\text{к}}) \rho_{1\text{н}} \dot{V}_{1\text{н}}, \quad (8.3)$$

а количество теплоты, воспринимаемой в единицу времени холодным теплоносителем, – по формуле:

$$\dot{Q}_2 = (h_{2\text{к}} - h_{2\text{н}}) \dot{m}_2 = (h_{2\text{к}} - h_{2\text{н}}) \rho_{2\text{н}} \dot{V}_{2\text{н}}, \quad (8.4)$$

где $h_{1\text{н}}$ и $h_{1\text{к}}$ – удельные энтальпии горячей воды при её начальной и конечной температуре в аппарате на входе в аппарат и выходе из аппарата соответственно, Дж/кг; $h_{2\text{н}}$ и $h_{2\text{к}}$ – удельные энтальпии холодной воды при её начальной и конечной температуре в аппарате на входе в аппарат и выходе из аппарата соответственно, Дж/кг; $\dot{m}_1$ и $\dot{m}_2$ – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей соответственно, кг/с; $\dot{V}_{1\text{н}}$ и $\dot{V}_{2\text{н}}$ – объёмные расходы горячего и холодного теплоносителей соответственно, измеренные ротаметрами (поз. 1 и 2), м³/с; $\rho_{1\text{н}}$ и $\rho_{2\text{н}}$ – плотности горячего и холодного теплоносителей при их начальных температурах соответственно, кг/м³.

Если $\dot{Q}_1 \approx \dot{Q}_2$, то результаты лабораторных измерений являются вполне достоверными. Обычно $\dot{Q}_2$ оказывается немного больше $\dot{Q}_1$, что можно объяснить теплообменом холодной воды с окружающей средой через стенку кожуха.

Для определения экспериментального значения коэффициента теплопередачи по формуле (8.1) рекомендуется принять $\dot{Q} = \dot{Q}_1$.

Средняя движущая сила теплопередачи (средняя разность температур теплоносителей в аппарате) как при противотоке, так и при прямотоке теплоносителей определяется по формуле:

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{\Delta T_{\text{н}} - \Delta T_{\text{к}}}{\ln \frac{\Delta T_{\text{н}}}{\Delta T_{\text{к}}}}, \quad (8.5)$$

где $\Delta T_{\text{н}} = T_{1\text{н}} - T_{2\text{н}}$; $\Delta T_{\text{к}} = T_{1\text{к}} - T_{2\text{к}}$ – при прямотоке жидкостей
и $\Delta T_{\text{н}} = T_{1\text{н}} - T_{2\text{к}}$; $\Delta T_{\text{к}} = T_{1\text{к}} - T_{2\text{н}}$ – при противотоке жидкостей.

2. Полученное экспериментально значение коэффициента теплопередачи сравните со значением, рассчитанным по уравнению аддитивности термических сопротивлений (8.2). Для этого необходимо рассчитать коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{\text{вн}}$ и $\alpha_{\text{н}}$.

2.1. Расчёт коэффициента теплоотдачи от горячей воды к поверхности теплообменной трубы ($\alpha_1 = \alpha_{\text{вн}}$) рекомендуется выполнять в следующем порядке:

а) рассчитайте среднюю (вдоль поверхности теплообмена) температуру горячей воды и определите при этой температуре физические свойства воды (в частности, плотность – ρ_1 ; динамическую вязкость – μ_1 ; теплопроводность – λ_1).

Если $(\Delta T_1 = T_{1\text{н}} - T_{1\text{к}}) < (\Delta T_2 = T_{2\text{к}} - T_{2\text{н}})$, то средняя температура горячей воды

$$T_{1\text{ср}} = \frac{T_{1\text{н}} + T_{1\text{к}}}{2}. \quad (8.6)$$

Если же $(\Delta T_1 = T_{1\text{н}} - T_{1\text{к}}) > (\Delta T_2 = T_{2\text{к}} - T_{2\text{н}})$, то средняя температура горячей воды рассчитывается так:

$$T_{1\text{ср}} = T_{2\text{ср}} + \Delta T_{\text{ср}}, \quad (8.7)$$

где $T_{2\text{ср}} = \frac{T_{2\text{н}} + T_{2\text{к}}}{2}$ – средняя температура холодной воды;

б) рассчитайте среднюю скорость воды в теплообменных трубах и число Рейнольдса (Re_1);

в) рассчитайте число Нуссельта (Nu_1) используя одно из приведённых ниже критериальных уравнений (в зависимости от гидродинамического режима течения теплоносителя):

при $2300 < Re < 10000$

$$Nu = 0,0235 \left(Re^{0,8} - 230 \right) \cdot \left(1,8 Pr^{0,33} - 0,8 \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{l}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0,14}; \quad (8.8)$$

при $Re > 10000$

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (8.9)$$

где $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ – критерий Нуссельта; $Re = \frac{v l \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса;

$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$ – критерий Прандтля.

В формулах (8.8) и (8.9) определяющий линейный размер $l = d_э$ – эквивалентный диаметр канала, численно равный внутреннему диаметру теплообменных труб, т.е. $d_э = d_{вн}$; L – длина теплообменных труб.

В уравнениях (8.8) и (8.9) все физические свойства среды (кроме помеченных индексом «ст») определяются при средней вдоль поверхности теплообмена температуре теплоносителя; индекс «ст» означает, что свойства среды определяются при температуре стенки.

Поскольку температура теплообменных поверхностей в данном аппарате не измеряется, рекомендуется сделать следующее допущение:

$$\left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \approx 1 \quad \text{или} \quad \left(\frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0,14} \approx 1; \quad (8.10)$$

г) рассчитайте коэффициент теплоотдачи по формуле

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \lambda_1}{d_э} \quad (8.11)$$

2.2. Расчёт коэффициента теплоотдачи от поверхности теплообменных труб к холодной воде ($\alpha_2 = \alpha_н$) рекомендуется выполнять в следующем порядке:

а) определите физические свойства холодной воды (в частности, плотность – ρ_2 ; динамическую вязкость – μ_2 ; теплопроводность – λ_2) при её средней (вдоль поверхности теплообмена) температуре в теплообменнике.

Если $(\Delta T_1 = T_{1н} - T_{1к}) < (\Delta T_2 = T_{2к} - T_{2н})$, то средняя температура холодной воды

$$T_{2ср} = T_{1ср} - \Delta T_{ср} \quad (8.12)$$

б) рассчитайте число Рейнольдса (Re_2). Скорость потока, входящая в число Рейнольдса, определяется по формуле

$$v_2 = \frac{\dot{m}_2}{\rho_2 S_{мтр}} \quad (8.13)$$

где $S_{мтр} = 0,00221 \text{ м}^2$ – расчётная площадь проходного сечения в межтрубном пространстве.

в) рассчитайте число Нуссельта (Nu_2). Принимая во внимание нестандартное размещение сегментных перегородок в межтрубном пространстве аппарата и, как следствие, существенное различие в площадях проходных сечений в разных местах этого пространства, коэффициент теплоотдачи от поверхности труб к потоку воды в данном конкретном аппарате рекомендуется определять из уравнения:

$$Nu = 0,308 Re^{0,6} Pr^{0,32} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}. \quad (8.14)$$

В формуле (8.14) и, следовательно, в критерии Рейнольдса, определяющий линейный размер l – наружный диаметр теплообменной трубы $l = d_n$.

При расчёте критерия Нуссельта по формуле (8.14) необходимо знать температуру стенки. В данном случае рекомендуется сделать допущение, тождественное (8.10);

г) рассчитайте коэффициент теплоотдачи по формуле:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d_n}. \quad (8.15)$$

2.3. Рассчитайте коэффициент теплопередачи ($K_T \text{ расч}$) по формуле (8.2).

3. Экспериментальные и рассчитанные величины параметров занесите в табл. 8.1.

4. Проанализируйте полученные значения кинетических коэффициентов теплообмена α_1 , α_2 , $K_{T \text{ эксп}}$, $K_{T \text{ расч}}$ и сделайте выводы по работе.

Таблица 8.1

Экспериментальные и рассчитанные величины параметров

$\dot{V}_1$, $\frac{\text{л}}{\text{мин}}$	$\dot{m}_1$, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$T_{1\text{н}}$, $^{\circ}\text{C}$	$T_{1\text{к}}$, $^{\circ}\text{C}$	$\dot{Q}_1$, Вт	v_1 , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	Re_1	Nu_1	α_1 , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$K_{T \text{ расч}}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
$\dot{V}_2$, $\frac{\text{л}}{\text{мин}}$	$\dot{m}_2$, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$T_{2\text{н}}$, $^{\circ}\text{C}$	$T_{2\text{к}}$, $^{\circ}\text{C}$	$\dot{Q}_2$, Вт	v_2 , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	Re_2	Nu_2	α_2 , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	

Схема взаимного движения теплоносителей: _____;

$$\Delta T_{\text{ср}} = \text{___ К}; \quad K_{T \text{ эксп}} = \text{_____ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Контрольные вопросы

1. Каковы физический смысл и единицы измерения коэффициента теплопередачи?
2. С какой целью в межтрубном пространстве теплообменника размещены сегментные перегородки?
3. Какие параметры исследуемого теплообменника влияют на величину коэффициента теплопередачи?
4. Термическое сопротивление какой стадии теплопередачи оказалось лимитирующим в выполненной Вами работе?
5. Каково максимальное значение (в теоретическом пределе) коэффициента теплопередачи для данного теплообменника?
6. Как изменится коэффициент теплопередачи в исследуемом Вами аппарате, если в нём стеклянные трубки заменить на медные такого же размера?
7. Изменится ли коэффициент теплопередачи в исследуемом теплообменнике, если из 19 трубок 9 будут заглушены (при прочих равных условиях)?
8. Как выполнить расчёт коэффициента теплопередачи по формуле (8.1), если в эксперименте окажется, что $\Delta T_1 = \Delta T_2$?
9. Для чего предназначен ротаметр и каков принцип его действия?
10. Что означают буквы «F» и «I» на условном обозначении прибора на схеме установки?

Физические свойства воды

T , °C	ρ , кг/м ³	μ , мПа·с	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\beta \cdot 10^3$, К ⁻¹	σ , мДж/м ²	h' , кДж/кг	Pr
-35	966	—	5961	0,508	-4,91	—	-161,6	—
-30	983	—	5045	0,517	-2,34	—	-134,1	—
-25	991	—	4683	0,526	-1,10	—	-109,8	—
-20	995	—	4500	0,535	-0,540	—	-86,8	—
-15	997	—	4395	0,543	-0,310	—	-64,6	—
-10	998,15	2,60	4329	0,551	-0,217	77,04	-42,8	20,43
-5	999,30	2,14	4286	0,558	-0,166	76,34	-21,3	16,44
0	999,84	1,7921	4218,0	0,5664	-0,0683	75,64	0	13,35
1	999,90	1,7313	4214,2	0,5683	-0,0505	75,50	4,2	12,84
2	999,94	1,6728	4210,7	0,5701	-0,0328	75,36	8,4	12,36
3	999,96	1,6191	4207,6	0,5718	-0,0162	75,22	12,6	11,91
4	999,97	1,5674	4204,8	0,5735	0,0003	75,08	16,8	11,49
5	999,96	1,5188	4202,3	0,5751	0,0158	74,94	21,0	11,10
6	999,94	1,4728	4199,9	0,5767	0,0313	74,79	25,2	10,73
7	999,90	1,4284	4197,7	0,5783	0,0459	74,65	29,4	10,37
8	999,85	1,3860	4195,6	0,5798	0,0605	74,51	33,6	10,03
9	999,78	1,3462	4193,8	0,5813	0,0742	74,37	37,8	9,712
10	999,70	1,3077	4192,1	0,5828	0,0880	74,23	42,0	9,406
11	999,60	1,2713	4190,6	0,5844	0,1012	74,09	46,2	9,116
12	999,50	1,2363	4189,2	0,5859	0,1141	73,94	50,4	8,840
13	999,38	1,2028	4187,9	0,5875	0,1267	73,79	54,6	8,574
14	999,24	1,1699	4186,7	0,5891	0,1389	73,64	58,8	8,314
15	999,10	1,1391	4185,6	0,5906	0,1509	73,50	62,9	8,073
16	998,94	1,1095	4184,7	0,5922	0,1626	73,35	67,1	7,840
17	998,77	1,0811	4183,8	0,5937	0,1740	73,20	71,3	7,619
18	998,59	1,0539	4183,0	0,5953	0,1851	73,05	75,5	7,405
19	998,41	1,0278	4182,3	0,5968	0,1961	72,90	79,7	7,203
20	998,20	1,0026	4181,7	0,5983	0,2068	72,75	83,9	7,007
21	997,99	0,9785	4181,2	0,5999	0,2173	72,59	88,0	6,820
22	997,77	0,9553	4180,7	0,6014	0,2275	72,44	92,2	6,641
23	997,54	0,9330	4180,2	0,6029	0,2376	72,29	96,4	6,469
24	997,30	0,9115	4179,8	0,6044	0,2475	72,13	100,6	6,304
25	997,04	0,8907	4179,5	0,6059	0,2572	71,99	104,8	6,144
26	996,78	0,8708	4179,2	0,6074	0,2667	71,83	109,0	5,992
27	996,51	0,8515	4179,0	0,6089	0,2761	71,67	113,1	5,844
28	996,23	0,8330	4178,8	0,6104	0,2853	71,51	117,3	5,703
29	995,94	0,8150	4178,6	0,6119	0,2944	71,36	121,5	5,566
30	995,65	0,7977	4178,5	0,6133	0,3033	71,20	125,7	5,435
31	995,30	0,7810	4178,4	0,6148	0,3120	71,04	129,8	5,308
32	995,03	0,7649	4178,3	0,6162	0,3206	70,89	134,0	5,187
33	994,70	0,7493	4178,3	0,6176	0,3291	70,73	138,2	5,069
34	994,37	0,7342	4178,2	0,6190	0,3375	70,57	142,4	4,956

Примечание:

для отрицательных температур приведены свойства жидкой переохлажденной воды.

Продолжение

T , °C	ρ , кг/м ³	μ , мПа·с	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\beta \cdot 10^3$, К ⁻¹	σ , мДж/м ²	h' , кДж/кг	Pr
35	994,03	0,7196	4178,2	0,6204	0,3457	70,41	146,6	4,846
36	993,68	0,7054	4178,3	0,6218	0,3539	70,25	150,7	4,740
37	993,33	0,6917	4178,3	0,6232	0,3619	70,09	154,9	4,638
38	992,97	0,6785	4178,4	0,6246	0,3698	69,93	159,1	4,539
39	992,59	0,6656	4178,5	0,6259	0,3776	69,76	163,3	4,444
40	992,22	0,6532	4178,6	0,6273	0,3853	69,60	167,5	4,351
41	991,83	0,6411	4178,7	0,6286	0,3929	69,44	171,6	4,262
42	991,44	0,6294	4178,9	0,6299	0,4004	69,27	175,8	4,176
43	991,04	0,6180	4179,1	0,6312	0,4078	69,11	180,0	4,092
44	990,63	0,6070	4179,2	0,6325	0,4151	68,95	184,2	4,011
45	990,21	0,5963	4179,4	0,6338	0,4224	68,78	188,4	3,932
46	989,79	0,5859	4179,7	0,6351	0,4295	68,62	192,5	3,856
47	989,36	0,5758	4179,9	0,6363	0,4366	68,45	196,7	3,782
48	988,93	0,5660	4180,1	0,6375	0,4437	68,28	200,9	3,711
49	988,49	0,5564	4180,4	0,6388	0,4506	68,12	205,1	3,641
50	988,04	0,5471	4180,7	0,6400	0,4575	67,94	209,3	3,574
51	987,58	0,5381	4181,0	0,6412	0,4642	67,77	213,5	3,509
52	987,12	0,5293	4181,3	0,6423	0,4710	67,61	217,6	3,446
53	986,65	0,5208	4181,6	0,6434	0,4777	67,44	221,8	3,385
54	986,18	0,5124	4182,0	0,6446	0,4844	67,27	226,0	3,324
55	985,70	0,5043	4182,3	0,6458	0,4909	67,10	230,2	3,266
56	985,22	0,4964	4182,7	0,6469	0,4974	66,93	234,4	3,210
57	984,72	0,4887	4183,1	0,6480	0,5038	66,76	238,5	3,155
58	984,22	0,4812	4183,5	0,6490	0,5103	66,59	242,7	3,102
59	983,71	0,4739	4183,9	0,6501	0,5166	66,42	246,9	3,050
60	983,20	0,4668	4184,4	0,6511	0,5230	66,24	251,1	3,000
61	982,68	0,4599	4184,8	0,6522	0,5293	66,06	255,3	2,951
62	982,16	0,4531	4185,3	0,6532	0,5355	65,89	259,5	2,903
63	981,63	0,4465	4185,8	0,6542	0,5416	65,72	263,6	2,857
64	981,10	0,4401	4186,3	0,6552	0,5478	65,54	267,8	2,812
65	980,56	0,4338	4186,8	0,6562	0,5538	65,36	272,0	2,768
66	980,01	0,4276	4187,4	0,6571	0,5599	65,18	276,2	2,725
67	979,46	0,4216	4187,9	0,6580	0,5659	65,01	280,4	2,683
68	978,90	0,4158	4188,5	0,6589	0,5719	64,83	284,6	2,643
69	978,34	0,4101	4189,1	0,6598	0,5778	64,65	288,8	2,604
70	977,77	0,4045	4189,7	0,6607	0,5838	64,47	293,0	2,565
71	977,20	0,3990	4190,3	0,6616	0,5897	64,30	297,2	2,527
72	976,62	0,3937	4190,9	0,6625	0,5955	64,12	301,4	2,491
73	976,04	0,3885	4191,5	0,6633	0,6013	63,94	305,5	2,455
74	975,45	0,3833	4192,2	0,6641	0,6071	63,76	309,7	2,420
75	974,85	0,3784	4192,9	0,6649	0,6128	63,58	313,9	2,386
76	974,25	0,3735	4193,6	0,6657	0,6185	63,40	318,1	2,353
77	973,65	0,3687	4194,3	0,6664	0,6242	63,22	322,3	2,321
78	973,03	0,3640	4195,0	0,6672	0,6299	63,04	326,5	2,289
79	972,42	0,3595	4195,7	0,6680	0,6355	62,86	330,7	2,258

Продолжение

T , °C	ρ , кг/м ³	μ , мПа·с	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\beta \cdot 10^3$, К ⁻¹	σ , мДж/м ²	h' , кДж/кг	Pr
80	971,80	0,3550	4196,5	0,6689	0,6411	62,67	334,9	2,227
81	971,17	0,3506	4197,3	0,6697	0,6467	62,49	339,1	2,197
82	970,54	0,3463	4198,1	0,6704	0,6523	62,30	343,3	2,169
83	969,91	0,3421	4198,9	0,6711	0,6579	62,12	347,5	2,140
84	969,27	0,3380	4199,7	0,6718	0,6634	61,93	351,7	2,113
85	968,62	0,3340	4200,5	0,6724	0,6689	61,75	355,9	2,087
86	967,97	0,3300	4201,4	0,6730	0,6744	61,56	360,1	2,060
87	967,32	0,3262	4202,3	0,6736	0,6798	61,38	364,3	2,035
88	966,66	0,3224	4203,2	0,6741	0,6853	61,19	368,5	2,010
89	965,99	0,3187	4204,1	0,6746	0,6908	61,01	372,7	1,986
90	965,32	0,3150	4205,0	0,6751	0,6962	60,82	376,9	1,962
91	964,65	0,3115	4206,0	0,6756	0,7016	60,63	381,1	1,939
92	963,97	0,3080	4207,0	0,6760	0,7070	60,44	385,4	1,917
93	963,28	0,3046	4208,0	0,6764	0,7124	60,25	389,6	1,895
94	962,60	0,3012	4209,1	0,6768	0,7178	60,06	393,8	1,873
95	961,90	0,2979	4210,2	0,6772	0,7232	59,87	398,0	1,852
96	961,20	0,2946	4211,4	0,6775	0,7286	59,68	402,2	1,831
97	960,50	0,2914	4212,6	0,6779	0,7340	59,49	406,4	1,811
98	959,79	0,2883	4213,8	0,6782	0,7393	59,29	410,6	1,791
99	959,08	0,2853	4215,1	0,6785	0,7447	59,10	414,9	1,772
100	958,37	0,2823	4216,4	0,6788	0,7500	58,91	419,1	1,754
101	957,33	0,2794	4217,6	0,6791	0,7556	58,72	423,3	1,735
102	956,60	0,2765	4218,8	0,6794	0,7612	58,52	427,5	1,717
103	955,87	0,2736	4219,9	0,6797	0,7668	58,33	431,8	1,699
104	955,13	0,2709	4221,0	0,6799	0,7724	58,14	436,0	1,682
105	954,39	0,2681	4222,2	0,6802	0,7780	57,94	440,2	1,664
106	953,65	0,2654	4223,5	0,6804	0,7836	57,74	444,4	1,647
107	952,90	0,2627	4224,8	0,6807	0,7892	57,55	448,6	1,630
108	952,14	0,2601	4226,2	0,6809	0,7948	57,35	452,9	1,614
109	951,38	0,2575	4227,6	0,6811	0,8004	57,16	457,1	1,598
110	950,62	0,2550	4229,0	0,6813	0,8060	56,96	461,3	1,583
111	949,85	0,2525	4230,4	0,6815	0,8116	56,76	465,5	1,567
112	949,08	0,2501	4231,9	0,6817	0,8172	56,57	469,8	1,553
113	948,31	0,2478	4233,4	0,6819	0,8228	56,37	474,0	1,538
114	947,53	0,2454	4234,9	0,6821	0,8284	56,17	478,3	1,524
115	946,74	0,2431	4236,5	0,6823	0,8340	55,97	482,5	1,509
116	945,95	0,2408	4238,1	0,6825	0,8396	55,77	486,7	1,495
117	945,16	0,2386	4239,7	0,6826	0,8452	55,57	491,0	1,482
118	944,37	0,2364	4241,3	0,6828	0,8508	55,37	495,2	1,468
119	943,57	0,2342	4243,0	0,6829	0,8564	55,16	499,5	1,455
120	942,76	0,2321	4244,7	0,6830	0,8620	54,96	503,7	1,442

Примечание:

для температур выше 100 °C приведены свойства жидкой воды под давлением насыщенного пара.

Продолжение

T , °C	ρ , кг/м ³	μ , мПа·с	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\beta \cdot 10^3$, К ⁻¹	σ , мДж/м ²	h' , кДж/кг	Pr
125	938,67	0,2220	4253,7	0,6834	0,890	53,95	525,0	1,382
130	934,48	0,2127	4263,3	0,6834	0,918	52,93	546,3	1,327
135	930,19	0,2041	4273,7	0,6832	0,946	51,89	567,7	1,277
140	925,79	0,1961	4284,9	0,6829	0,974	50,85	589,1	1,230
145	921,29	0,1888	4297,0	0,6824	1,001	49,80	610,6	1,189
150	916,69	0,1819	4309,9	0,6819	1,028	48,74	632,2	1,150
155	911,98	0,1755	4323,7	0,6808	1,055	47,67	653,8	1,115
160	907,16	0,1696	4338,4	0,6797	1,081	46,58	675,5	1,083
165	902,24	0,1640	4354,1	0,6784	1,106	45,49	697,3	1,053
170	897,21	0,1588	4370,8	0,6768	1,130	44,40	719,1	1,026
175	892,07	0,1539	4388,6	0,6751	1,159	43,30	741,1	1,000
180	886,81	0,1494	4407,6	0,6732	1,190	42,19	763,1	0,978
185	881,43	0,1451	4427,9	0,6710	1,223	41,07	785,3	0,958
190	875,94	0,1410	4449,4	0,6687	1,258	39,95	807,5	0,938
195	870,32	0,1372	4472,4	0,6661	1,295	38,82	829,9	0,921
200	864,58	0,134	4497	0,6633	1,335	37,69	852,4	0,908
205	858,71	0,130	4520	0,6567	1,380	36,55	874,9	0,895
210	852,70	0,127	4548	0,6531	1,426	35,41	897,6	0,884
215	846,55	0,124	4578	0,6493	1,469	34,28	920,4	0,874
220	840,26	0,121	4611	0,6453	1,517	33,16	943,4	0,865
225	833,81	0,118	4645	0,6411	1,564	32,09	966,5	0,855
230	827,21	0,115	4683	0,6366	1,616	31,00	989,9	0,846
235	820,44	0,113	4723	0,6320	1,673	29,79	1013	0,844
240	813,49	0,110	4767	0,6272	1,728	28,55	1037	0,836
245	806,37	0,108	4814	0,6221	1,791	27,37	1061	0,836
250	799,05	0,106	4865	0,6169	1,856	26,19	1085	0,836
255	791,53	0,104	4920	0,6114	1,927	24,96	1110	0,837
260	783,79	0,101	4981	0,6058	2,004	23,74	1134	0,830
265	775,82	0,099	5047	0,5999	2,084	22,60	1160	0,833
270	767,61	0,097	5119	0,5938	2,174	21,48	1185	0,836
275	759,13	0,095	5198	0,5875	2,268	20,30	1211	0,841
280	750,38	0,093	5286	0,5810	2,375	19,13	1237	0,846
285	741,31	0,091	5383	0,5743	2,489	18,01	1264	0,853
290	731,92	0,090	5492	0,5673	2,611	16,87	1291	0,871
295	722,18	0,088	5614	0,5601	2,754	15,65	1319	0,882
300	712,04	0,086	5752	0,5526	2,889	14,42	1345	0,895
310	690,66	0,082	6088	0,5369	3,242	12,07	1402	0,930
320	667,08	0,078	6541	0,5200	3,712	9,810	1462	0,981
330	640,78	0,074	7189	0,5017	4,347	7,671	1526	1,060
340	610,68	0,070	8217	0,4820	5,276	5,670	1594	1,193
350	574,69	0,066	10100	0,4605	6,624	3,816	1671	1,448
360	527,84	0,060	14870	0,4389	—	2,021	1762	2,044
370	450,03	0,052	47100	0,4470	—	0,471	1893	—
373,95	322,18	0,039	—	—	—	0	2087	—