

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

ВРЕМЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Теплообменный процесс, в котором температура среды в какой-либо точке изменяется во времени, называется нестационарным. К такому процессу относится, например, процесс охлаждения жидкости в аппарате периодического действия. Охлаждение жидкости может быть осуществлено передачей теплоты от неё к хладагенту, подаваемому либо в рубашку аппарата, либо во встроенный в аппарат змеевик.

Одним из основных показателей подобного процесса является время его проведения. Время охлаждения идеально перемешиваемой жидкости в аппарате периодического действия (при условии постоянства коэффициента теплопередачи и постоянства расхода хладагента с неизменной во времени начальной температурой) может быть рассчитано теоретически по формуле:

$$t_{\text{теор}} = \frac{m_1 \cdot c_{p1}}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}} \cdot \frac{N}{N-1} \cdot \ln \left(\frac{T_{1,0} - T_{2\text{in}}}{T_{1,k} - T_{2\text{in}}} \right), \quad (10.1)$$

где $N = \exp \left(\frac{K_T \cdot A}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}} \right) = \text{const}$; m_1 – масса охлаждаемой жидкости; \dot{m}_2 –

массовый расход хладагента; c_{p1} и c_{p2} – удельные теплоёмкости охлаждаемой жидкости и хладагента соответственно; $T_{1,0}$ и $T_{1,k}$ – температуры охлаждаемой жидкости начальная и конечная соответственно; $T_{2\text{in}}$ – начальная температура хладагента; K_T – коэффициент теплопередачи; A – площадь поверхности теплопередачи.

Цель работы: экспериментальное определение времени охлаждения жидкости в аппарате с мешалкой и змеевиком до заданной конечной температуры при нестационарном теплообмене; расчёт среднего значения коэффициента теплопередачи за период охлаждения; расчёт теоретического времени охлаждения жидкости при нестационарном теплообмене.

Описание установки

Схема установки изображена на рис. 10.1.

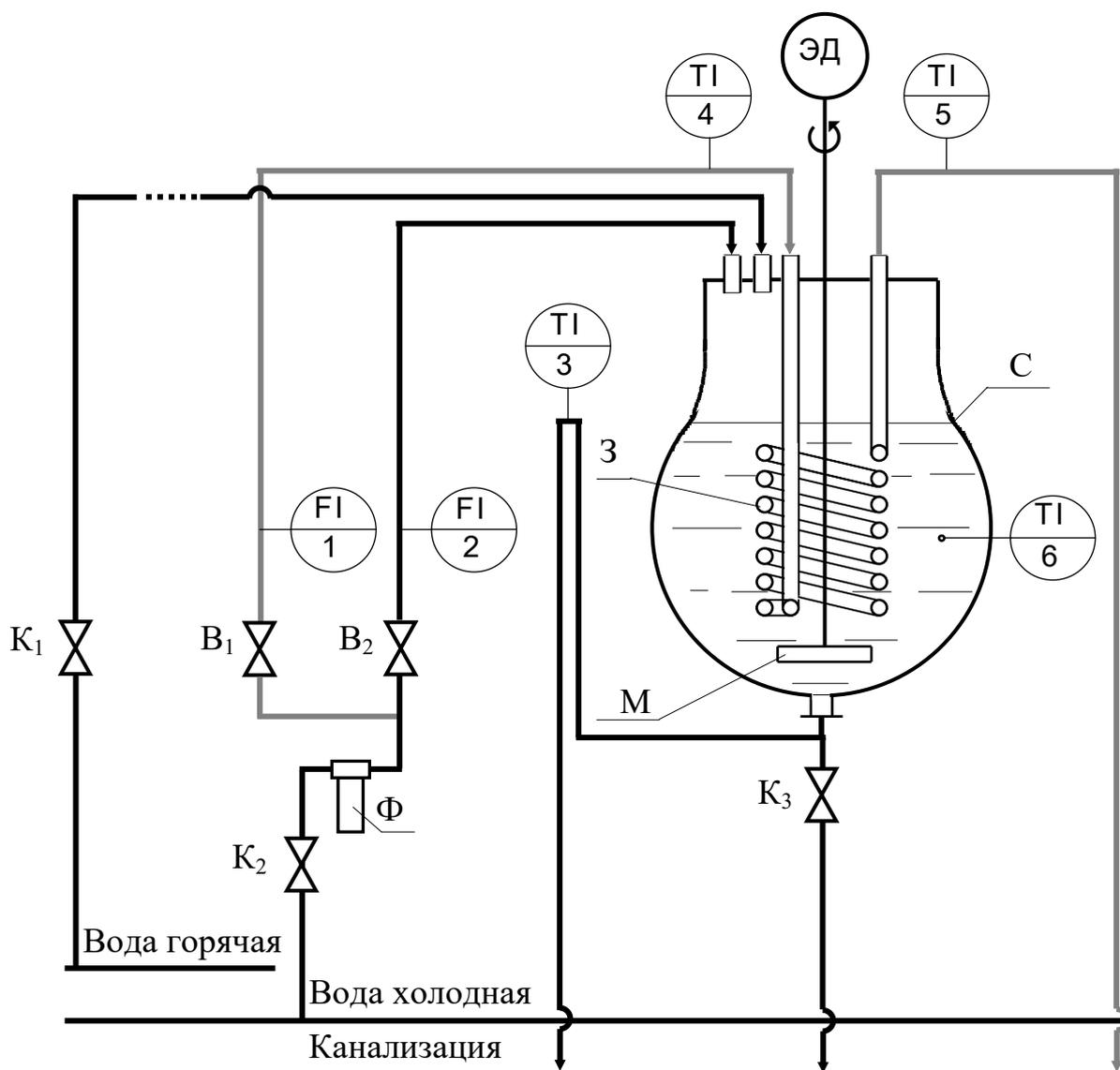


Рис. 10.1. Схема лабораторной установки для изучения нестационарного теплообмена [6, 9]

Основным элементом установки является стеклянный реакционный сосуд С грушевидной формы.

Благодаря специально организованному стоку воды через гидравлический затвор, объём жидкости в заполненном аппарате постоянен и равен $V_C = 24,57 \text{ дм}^3$. Средний диаметр заполненной части сосуда составляет $D_C = 0,292 \text{ м}$.

Сосуд снабжён змеевиком З, изготовленным из стеклянной трубки размером $\varnothing 18,2 \times 1,8$ мм; диаметр витка змеевика $D_{\text{вит}} = 172,5$ мм. Площадь поверхности погружённой части змеевика, определённая по *наружному* размеру трубки $A = 0,405$ м². Боросиликатное стекло, из которого выполнен змеевик, имеет теплопроводность $\lambda_{\text{ст}} = 1,14$ Вт/(м·К).

В змеевик может быть подана из водопровода холодная вода, протекающая через фильтр Ф. Расход воды регулируется вентилем В₁ и измеряется ротаметром (поз. 1), имеющим на поверхности трубки шкалу, отградуированную в «л/мин» («LPM»).

Аппарат снабжён стеклянной лопастной мешалкой М диаметром $d_{\text{м}} = 136$ мм, вращаемой электродвигателем ЭД. Частота вращения мешалки $n = 2$ с⁻¹.

Лабораторная установка оборудована электронными термометрами (поз. 4, 5), установленными соответственно на линии подачи холодной воды и на линии выхода воды из змеевика. Температура в объёме сосуда измеряется ртутным термометром (поз. 6).

Методика выполнения работы

В самом общем случае изначально вода в сосуде, в трубке змеевика и в коммуникациях имеет комнатную температуру.

Для проведения эксперимента сосуд должен быть заполнен горячей водой, подаваемой из водонагревателя автономной системы горячего водоснабжения. На линии, соединяющей водонагреватель и сосуд С установлен кран К₁ (вблизи водонагревателя).

Предварительную подготовку установки к эксперименту рекомендуется выполнить в следующем порядке:

1. Убедитесь, что кран К₁ на линии подачи горячей воды закрыт.
2. Откройте кран К₃ и опорожните ёмкость.
3. Закройте кран К₃. Откройте кран К₁ на линии подачи горячей воды и заполните сосуд С.

Если вода в сосуде имеет температуру близкую к комнатной (так как сначала сосуд заполняется водой, имеющей в коммуникационных трубопроводах комнатную температуру), то следует дождаться поступления в со-

суд нагретой в водоподогревателе воды, прекратить её подачу и опорожнить сосуд. После опорожнения сосуда повторить действия пункта 3 с начала.

4. При достижении уровня воды в сосуде, покрывающим на 1,5–2 см верхний виток спирали змеевика, закройте кран K_1 на линии подачи горячей воды.

5. Дождитесь полного стока избытка воды из сосуда в канализацию.

После заполнения сосуда горячей водой установка подготовлена к проведению эксперимента.

Далее рекомендуется выполнение следующих процедур:

6. Включите привод мешалки M .

7. Откройте кран K_2 ; с помощью вентиля B_1 организуйте подачу охлаждающей воды (хладагента) в змеевик Z с постоянным заданным расходом, определяемым по отметке шкалы ротаметра (поз. 1), обозначенной *верхним* краем поплавка.

8. В течение всего эксперимента фиксируйте через равные интервалы времени $\Delta t = 2$ мин температуры: воды в сосуде ($T_{1,i}$), воды на входе в змеевик ($T_{2\text{ in},i}$) и на выходе её из змеевика ($T_{2\text{ out},i}$). Фиксация температур в трёх указанных точках должна выполняться одновременно.

Осуществите охлаждение содержимого сосуда до конечной температуры $T_{1,k} \leq 20$ °С. Зафиксируйте экспериментальное время охлаждения $t_{\text{эксп}}$, кратное двум минутам.

9. Завершив охлаждение содержимого сосуда, закройте вентиль B_1 подачи холодной воды в змеевик и выключите привод мешалки.

10. Экспериментальные и рассчитанные в последующем величины параметров занесите в табл. 10.1.

Обработка экспериментальных данных

Экспериментальные данные используются для расчёта среднего значения коэффициента теплопередачи за период охлаждения и для расчёта теоретического времени охлаждения жидкости при нестационарном теплообмене.

Таблица 10.1

Экспериментальные и рассчитанные величины параметров

i	t_i , мин	$T_{1,i}$, °C	$T_{2\text{ in},i}$, °C	$T_{2\text{ out},i}$, °C
0	0			
1	2			
2	4			
...
k				
Средние температуры за период охлаждения				

1. Расчёт коэффициента теплопередачи рекомендуется выполнить по уравнению аддитивности термических сопротивлений при переносе теплоты через цилиндрическую незагрязненную стенку, для чего необходимо рассчитать коэффициенты теплоотдачи: от охлаждаемой воды к поверхности теплообменной трубы ($\alpha_1 = \alpha_n$) и от поверхности теплообменной трубы к охлаждающей воде ($\alpha_2 = \alpha_{вн}$).

Расчёт коэффициента теплоотдачи от охлаждаемой воды к поверхности теплообменной трубы рекомендуется выполнять в следующем порядке:

а) определите физические свойства охлаждаемой воды при температуре, средней за период эксперимента, и к тому же средней вдоль поверхности теплообмена.

Принимая идеальное перемешивание охлаждаемой жидкости, то есть, полагая, что её температура не зависит от пространственной координаты, а зависит только от времени $T_1 = f(t)$, средняя за период эксперимента температура может быть определена по соотношению:

$$\bar{T}_1 = \frac{1}{t_{\text{эксп}}} \int_0^{t_{\text{эксп}}} T_{1,i} dt \approx \frac{1}{t_{\text{эксп}}} \cdot \left(\frac{T_{1,0}}{2} + \sum_{i=1}^{i=k-1} T_{1,i} + \frac{T_{1,k}}{2} \right) \cdot \Delta t. \quad (10.2)$$

б) определите число Нуссельта (Nu_1), используя критериальное уравнение:

$$\text{Nu} = 0,87 \text{Re}_M^{0,62} \text{Pr}^{0,33} \Gamma \left(\frac{\mu}{\mu_{\text{ст}}} \right)^{0,14}, \quad (10.3)$$

где $\text{Re}_M = \frac{n d_M^2 \rho}{\mu}$ – число Рейнольдса при перемешивании; $\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda}$ – критерий Прандтля; $\Gamma = \frac{d_M}{D_c}$ – симплекс геометрического подобия; n – частота вращения мешалки, с^{-1} .

Определяющим линейным размером в критериях подобия уравнения (10.3) является диаметр мешалки d_M .

Поскольку температуры теплообменных поверхностей в данном аппарате не измеряются, рекомендуется сделать допущение $\left(\frac{\mu}{\mu_{\text{ст}}} \right)^{0,14} \approx 1$.

в) рассчитайте коэффициент теплоотдачи по формуле

$$\alpha_1 = \frac{\text{Nu}_1 \lambda_1}{d_M}. \quad (10.4)$$

Расчёт коэффициента теплоотдачи от поверхности теплообменной трубы к охлаждающей воде рекомендуется выполнять в следующем порядке:

а) определите физические свойства охлаждающей воды при температуре, средней за период эксперимента, и к тому же средней вдоль поверхности теплообмена.

Температура охлаждающей воды, подаваемой в змеевик, в общем случае изменяется во времени как в точке входа в змеевик, так и в точке выхода из него.

Средняя за период эксперимента температура воды на входе в змеевик может быть определена по соотношению:

$$\bar{T}_{2 \text{ in}} = \frac{1}{t_{\text{эксп}}} \int_0^{t_{\text{эксп}}} T_{2 \text{ in}, i} dt \approx \frac{1}{t_{\text{эксп}}} \cdot \left(\frac{T_{2 \text{ in}, 0}}{2} + \sum_{i=1}^{i=k-1} T_{2 \text{ in}, i} + \frac{T_{2 \text{ in}, k}}{2} \right) \cdot \Delta t. \quad (10.5)$$

Средняя за период эксперимента температура воды на выходе из змеевика:

$$\bar{T}_{2\text{out}} = \frac{1}{t_{\text{эксп}}} \int_0^{t_{\text{эксп}}} T_{2\text{out},i} dt \approx \frac{1}{t_{\text{эксп}}} \cdot \left(\frac{T_{2\text{out},0}}{2} + \sum_{i=1}^{i=k-1} T_{2\text{out},i} + \frac{T_{2\text{out},k}}{2} \right) \cdot \Delta t. \quad (10.6)$$

Осреднение температуры по длине змеевика может быть выполнено по упрощённому соотношению:

$$\bar{T}_2 = \frac{\bar{T}_{2\text{in}} + \bar{T}_{2\text{out}}}{2}; \quad (10.7)$$

б) рассчитайте число Рейнольдса:

$$\text{Re}_2 = \frac{v_2 d_3 \rho_2}{\mu_2}, \quad (10.8)$$

где ρ_2 и μ_2 – плотность и вязкость воды при температуре, определенной по формуле (10.7), $d_3 = d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы змеевика.

Скорость потока, входящая в число Рейнольдса, определяется по формуле:

$$v_2 = \frac{\dot{m}_2}{\rho_2 S_{\text{тр}}} = \frac{\rho_{2,\text{н}} \dot{V}_2}{\rho_2 S_{\text{тр}}}, \quad (10.9)$$

где $\rho_{2,\text{н}}$ – плотность воды при температуре воды на входе в змеевик; \dot{V}_2 – объёмный расход, определяемый с помощью ротаметра (поз. 1);

$S_{\text{тр}} = \pi \frac{d_{\text{вн}}^2}{4}$ – площадь сечения трубки змеевика;

в) рассчитайте число Нуссельта (Nu_2), используя одно из приведённых ниже критериальных уравнений:

$$\text{при } 13,5 \cdot \left(\frac{d_{\text{вн}}}{D_{\text{внт}}} \right)^{-0,5} < \text{Re} < 18500 \cdot \left(\frac{d_{\text{вн}}}{D_{\text{внт}}} \right)^{0,28}, \text{ что соответствует ламинарному течению с вторичной циркуляцией жидкости,}$$

$$\text{Nu} = 0,0575 \text{Re}^{0,75} \text{Pr}^{0,43} \left(\frac{d_{\text{вн}}}{D_{\text{внт}}} \right)^{0,21} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)^{0,25} \quad (10.10)$$

при $Re > 18500 \cdot \left(\frac{d_{\text{вн}}}{D_{\text{внт}}}\right)^{0,28}$, что соответствует турбулентному течению с вторичной циркуляцией жидкости,

$$Nu = 0,0266 \left[Re^{0,85} \left(\frac{d_{\text{вн}}}{D_{\text{внт}}}\right)^{0,15} + 0,225 \left(\frac{d_{\text{вн}}}{D_{\text{внт}}}\right)^{-1,55} \right] Pr^{0,4}. \quad (10.11)$$

Определяющий линейный размер в критериях подобия уравнений (10.10) и (10.11) есть внутренний диаметр змеевика $d_{\text{вн}}$.

В формулах (10.10) и (10.11) все физические свойства среды (кроме помеченных индексом «ст») определяются при температуре, рассчитанной по формуле (10.7); индекс «ст» означает, что свойства среды определяются при температуре стенки.

Поскольку температуры теплообменных поверхностей в данном аппарате не измеряются, то при расчёте по формуле (10.10) рекомендуется

сделать следующее допущение $\left(\frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25} \approx 1$;

г) рассчитайте коэффициент теплоотдачи по формуле

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d_{\text{вн}}}. \quad (10.12)$$

Рассчитайте коэффициент теплопередачи, отнесённый к единице площади *наружной* поверхности теплообменной трубы, по формуле

$$K_T = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \frac{d_{\text{н}}}{2\lambda_{\text{ст}}} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} \right)^{-1}, \quad (10.13)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ и $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициенты теплоотдачи с наружной и внутренней стороны теплообменной трубы, соответственно; $d_{\text{н}}$ и $d_{\text{вн}}$ – наружный и внутренний диаметры теплопередающей трубы, соответственно; $\lambda_{\text{ст}}$ – теплопроводность материала теплопередающей трубы (стенки).

2. Вычисленное значение коэффициента теплопередачи K_T используйте для расчёта теоретического времени охлаждения по формуле (10.1).

3. Сделайте заключение о применимости теоретического расчёта к прогнозированию времени охлаждения жидкости в аппарате с мешалкой и змеевиком при заданном коэффициенте теплопередачи и при заданных начальной и конечной температурах воды.

Контрольные вопросы

1. Какой теплообменный процесс называется нестационарным, а какой – стационарным?
2. Какие гидродинамические режимы течения жидкости в змеевике Вам известны?
3. Изменится ли время охлаждения жидкости в исследуемом аппарате, если в нём поместить стеклянную трубку змеевика меньшего диаметра с площадью поверхности теплопередачи $0,405 \text{ м}^2$ (при прочих равных условиях)?
4. Как изменится время охлаждения жидкости в исследуемом аппарате, если в нём стеклянную трубку змеевика заменить медной такого же размера?
5. Отразится ли на времени охлаждения жидкости отключение привода мешалки?
6. Отразится ли на времени охлаждения жидкости, находящейся в аппарате, замена подаваемой в змеевик воды на органическую жидкость, например, бензол (при прочих равных условиях)?
7. Что в исследуемом аппарате охладится быстрее – вода или бензол? Ответ обоснуйте.
8. С какой целью труба, по которой вода вытекает из сосуда, вначале поднята вверх, и лишь затем опущена до уровня канализационной линии?
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	—