



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства  
та природокористування

Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики та машинознавства

**02-04-23**

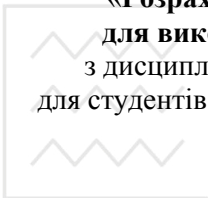
**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторної роботи

**«Розрахунок газотрубного котла-утилізатора  
для використання тепла технологічних газів»**

з дисципліни „Енергоощадність в теплоенергетиці”

для студентів спеціальності 7.05060101 „Теплоенергетика”



та природокористування

Рекомендовано  
методичною комісією  
зі спеціальності  
«Теплоенергетика»  
Протокол № 3  
від 27 листопада 2013 р.

Рівне 2014



Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи „Розрахунок газотрубного котла-утилізатора для використання технологічних газів” з дисципліни „Енергоощадність в теплоенергетиці” для студентів спеціальності 7.05060101 „Теплоенергетика”/ Герасимов Г.Г.– Рівне: НУВГП, 2014. – 16 с.

Укладач: канд. техн. наук Г.Г. Герасимов

Відповідальний за випуск: Рябенко О.А. доктор техн. наук, професор, завідувач кафедру гідроенергетики, теплоенергетики та гідромашин.



## ЗМІСТ

	Стор.
1. Загальні відомості і вихідні дані для розрахунку.....	3
2. Вибір типу і визначення основних розмірів котла-утилізатора.....	4
3. Визначення коефіцієнта теплопередачі.....	5
4. Визначення теплових втрат.....	6
5. Визначення паропроductивності котла-утилізатора.....	7
6. Аеродинамічний розрахунок.....	7
Література.....	8
Додатки.....	9

© Герасимов Г.Г., 2014

© НУВГП, 2014



## 1. Загальні відомості і вихідні дані для розрахунку

Тепло газів, які відходять від високотемпературних печей, а також гарячих технологічних газів використовується в котлах-утилізаторах. В залежності від призначення ці котли бувають або газотрубними з природною циркуляцією води, водотрубними з природною циркуляцією або змієвиковими з багатократною примусовою циркуляцією. Характерними прикладами використання вторинних енергоресурсів є встановлення котлів-утилізаторів за мартенівськими печами, трубчастими печами для нафтопереробки і в пристроях для сухого гасіння коксу.

Котли-утилізатори охолоджують відхідні гази до  $250^{\circ}\text{C}$ . Димососи, як відомо, працюють надійно при температурі нижче  $300^{\circ}\text{C}$ , тому встановлення котлів-утилізаторів відкрила можливість, використовуючи димососи, переводити печі на примусову тягу.

Існує понад 40 типів котлів-утилізаторів. Котли-утилізатори поділяють на низькотемпературні і високотемпературні. До першої групи відносяться котли-утилізатори, які призначені тільки для використання тепла відхідних газів.

В низькотемпературних котлах-утилізаторів температура димових газів перед котлом не перевищує  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Газотрубний котел-утилізатор показано на рис. 1.

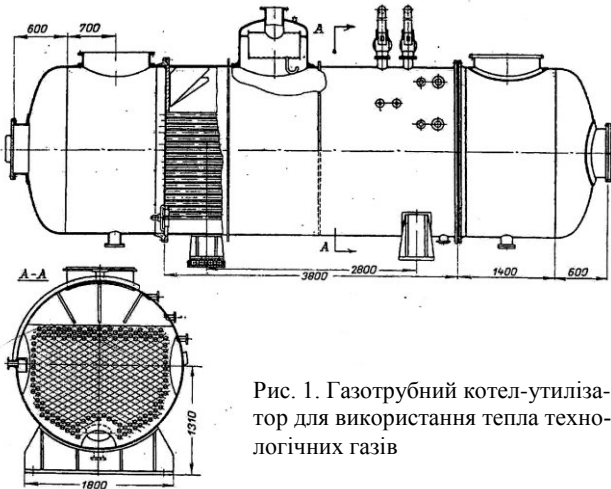


Рис. 1. Газотрубний котел-утилізатор для використання тепла технологічних газів



До барабану котла з прямими нагрівальними трубками закріплені вхідна і вихідна газові камери з вхідним і вихідним патрубками. Всередині барабана над поверхнею води розташовано паросепараторний пристрій [3-6].

Завданням лабораторної роботи є розробка проекту котла-утилізатора для використання технологічних газів, які уходять від печі хімічного виробництва.

Вихідні дані для розрахунку котла-утилізатора.

1. Температура газів, які виходять з печі, °С..... $t_2'$
2. Температура газів після котла, °С..... $t_2''$
3. Кількість газів при нормальних умовах, м<sup>3</sup>/год..... $V_0$
4. Температура живильної води, °С..... $t_{жв}$
5. Пара насичена з абсолютним тиском, ат..... $p$

## 2. Вибір типу визначення основних розмірів котла-утилізатора

Гази перед котлом мають невисоку температуру  $t_2' = \dots \text{°C}$ , а абсолютний тиск насиченої пари складає всього  $p = \dots \text{ ат}$ . В цих умовах найбільш підходить газотрубний котел-утилізатор з великим об'ємом, який відрізняється простотою у відношенні обслуговування і великою надійністю. Оскільки використовується тепло цінних технологічних газів, котел використовується з високим ступенем газощільності. Конструкція котла показана на рис. 1.

Середня температура газу  $t_{сер} = (t_2' + t_2'')/2$ .

При значенні середньої температури газу знаходять теплофізичні параметри газу: коефіцієнт кінематичної в'язкості  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с; коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ , Вт/(м К); критерій Прандтля Pr, користуючись таблицею 3 додатка.

Густина технологічного відхідного газу визначається за формулою

$$\rho_t = \rho_0 \frac{273}{273 + t}, \quad (2.1)$$

де  $\rho_0$ - густина газу при нормальних умовах,  $\rho_0 = 1,26 \text{ кг/м}^3$ . Визначають густину газу для температур:  $t_2'$ ,  $t_{сер}$ ,  $t_2''$  відповідно  $\rho_{вх}$ ,  $\rho_{сер}$ ,  $\rho_{вих}$ .

Масова витрата газу через котел-утилізатор  $M = V_0 \rho_0$ , кг/год.

Приймаємо середню швидкість димових газів  $w_{сер}$  при температурі  $t_{сер}$  в межах 10...15 м/с. Необхідну площу поперечного перерізу труб знаходимо за формулою (м<sup>2</sup>)



$$F_{mp} = \frac{M}{3600 \rho_{cep} w_{cep}} \quad (2.2)$$

Труби вибирають сталевими і розташування їх в трубній решітці приймають по кутам рівнобічного трикутника.

Труби приймають у відповідності з сортаментом сталевих труб з внутрішніми діаметрами 40; 50; 60 мм і товщинами стінки 3,5; 4,0; 4,5; 5,0 мм.

Кількість труб, що розташовуються на трубній дошці, знаходять за формулою

$$n = 4 F_{tp} / (\pi d_{вн}^2), \quad (2.3)$$

де  $d_{вн}$  – внутрішній діаметр трубок, м.

В поперечному перерізі котла-утилізатора передбачають паровий простір, отвір для циркуляції води і люк в перегородці для очищення від накипу міжтрубної частини.

### 3. Визначення коефіцієнта теплопередачі

Коефіцієнт тепловіддачі ( $Вт/(м^2/К)$ ) конвекцією від димових газів до стінок труб при поздовжньому русі газів в трубах [1, с 41, 7, с. 265].

$$\alpha_k = 0,023 \frac{\lambda}{d_e} \left( \frac{w_{cep} d_e}{\nu} \right)^{0,8} Pr^{0,4} C_t C_l, \quad (3.1)$$

де  $d_e$  – еквівалентний діаметр, м; для круглих труб еквівалентний діаметр дорівнює внутрішньому, тобто  $d_e = d_{вн}$ ;  $C_t$  і  $C_l$  – поправочні коефіцієнти. Приймають при охолодженні газів  $C_t=1,06$  і при  $l/d_{вн} > 50$   $C_l=1$ .

Критерій Рейнольда  $w_{cep} d_e / \nu$  порівнюють з граничним значенням 10000. Формула (3.1) правдива при  $Re > 10000$ .

Теплообмін випромінюванням в умовах невисокої температури газу і невеликому значенні ефективної товщини газового шару тепловіддачу збільшує в малій степені, тому не враховується.

Знаходять температуру насичення пари  $t_{ин}$  при тиску  $p$  за таблицею 7 додатка. Таку саму температуру має вода на лінії насичення при тиску  $p$ .

Температурний напір  $\Delta t$ , тобто осереднена по усій поверхні нагріву різниця температур середовищ, яка залежить від взаємного напрямку руху середовищ.



Знаходять різницю температур середовищ: газового і води, яка має однакову температуру  $t_{mn}$  як з боку входу газів, так і з боку виходу газів.

$$\Delta t_{\bar{o}} = t_2' - t_{mn}; \quad \Delta t_M = t_2'' - t_{mn}.$$

Температурний напір  $\Delta t = (\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_M) / \ln(\Delta t_{\bar{o}} / \Delta t_M)$

Коефіцієнт теплопередачі випарної поверхні [1, с. 37]

$$k = \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1 \varepsilon}, \quad (3.2)$$

де  $\alpha_1 = \alpha_k$ ;  $\varepsilon$  - коефіцієнт забруднення поверхні нагріву, приймаємо  $\varepsilon = 0,005$ .

Втрати тепла котлом-утилізатором в оточуюче середовище приймаємо (з наступною перевіркою)  $q_{o.c.} = 1,0 \%$ .

Тепло, яке передається газами в котлі, кВт:

$$Q = (M/\rho_o)c_{сеп}(t_2' - t_2'')/3600 = V_o c_{сеп}(t_2' - t_2'')/3600, \quad (3.3)$$

де  $c_{сеп}$  - середня об'ємна теплоємність газів, приймають

$$c_{сеп} = 1,388 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ К}).$$

Поверхня нагріву котла-утилізатора,  $\text{м}^2$

$$F = \frac{Q - Q_{o.c.} 1000}{k \Delta t} = \frac{(1 - q_{o.c.}) Q \cdot 1000}{k \Delta t} \quad (3.4)$$

Довжина труб, м

$$l = F / (\pi d_{en} n) \quad (3.5)$$

#### 4. Визначення теплових втрат

Котел-утилізатор розміщується на відкритому повітрі і його поверхня покривається шаром теплової ізоляції, яка захищається від дії атмосферних опадів пофарбованим металевим кожухом. При швидкості вітру 5 м/с для апаратів діаметром  $D_{\bar{o}} = 2$  м і зовнішнім діаметром  $D_{зov} = 2,16$  м коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні ізоляції складає  $\alpha_{зov} = 83,72 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ К})$ .

Питомі тепловитрати за нормами проектування теплової ізоляції при зимовій розрахунковій температурі:

для камери входу газу  $q_{вх} = 669,76 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \text{ год})$ ;

для корпусу (циліндра)  $q_{кор} = 418,6 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \text{ год})$ ;

Зовнішня поверхня камери входу газів

$$S_{вх} = S_{цил} + S_{сф.сегм} = \pi D_{зov} l + \pi(h^2 + 2a^2) = \\ = 3,14 \cdot 2,16 \cdot 1,07 + 3,14 \cdot (0,5^2 + 2 \cdot 1,08^2) = 15,34 \text{ м}^2.$$



Поверхня корпусу (циліндра)  $S_{кор} = \pi D_{зов} (l + 0,1)$ ;

Тепловтрати вхідною камерою  $Q_{1 о.с} = q_{ex} S_{ex}$ ;

Тепловтрати корпусом  $Q_{2 о.с} = q_{кор} S_{кор}$ ;

Тепловтрати вихідною камерою не враховуємо. Загальні втрати тепла  $Q_{о.с} = Q_{1 о.с} + Q_{2 о.с}$ ;

Відносні загальні втрати тепла  $(Q_{о.с}/Q)/100$ , % необхідно порівняти з попередньо прийнятими. (1 %).

## 5. Визначення паропродуктивності котла утилізатора

Рівняння теплового балансу котла-утилізатора

$$Q = D(h'' - h') + Q_{о.с}. \quad (5.1)$$

де  $Q$  і  $Q_{о.с}$  – відповідно тепло, яке передається парі і в оточуюче середовище, кВт;  $h''$  – ентальпія сухої насиченої пари, кДж/кг, при тиску  $p$ , знаходиться за таблицею 7 додатка;  $h'$  – ентальпія живильної води, кДж/кг, при температурі  $t_{жв}$  за таблицею 5 додатка.

З формули (5.1) визначаємо паропродуктивність котла-утилізатора, кг/с

$$D = \frac{Q - Q_{о.с}}{h'' - h'}. \quad (5.2)$$

## 6. Аеродинамічний розрахунок

Площа поперечного перерізу патрубків газової камери

$$F_{ex} = F_{вих} = (\pi d_{ex}^2)/4 \quad (6.1)$$

Швидкість газу (м/с) у вхідному патрубку при діаметрах патрубків  $d_{ex} = d_{вих} = 0,9$  м

$$w_{ex} = \frac{M}{\rho_{ex} F_{ex} \cdot 3600}. \quad (6.2)$$

Місцеві втрати тиску (мм вод. ст.) на вході в газову камеру при коефіцієнті

входу  $\xi_{ex} = 1,5$  (аналогічно  $\xi_{вих} = 1,5$ )

$$\Delta h_{ex} = \xi_{ex} (w_{ex}^2 / 2g) \rho_{ex}. \quad (6.3)$$

Втрати тиску на тертя в трубах при  $t_{cep}$ ,  $w_{cep}$ ,  $\rho_{cep}$ ;  $l_{mp} = l$  і шорсткості труб  $k_{ш} = 0,2$  мм,  $C_{ш} = 0,7$ ;  $\Delta h_{zp} = 6,75$  мм вод.ст. знаходять за формулою [2, с. 106]

$$\Delta h_{mp} = \Delta h_{zp} C_{ш} l. \quad (6.4)$$

Втрати тиску (мм вод. ст.) внаслідок зміни перерізів при вході і виході газів в трубчасту частину при відношенні площин  $F_{mp}/F_{кам} = \dots$  становить за [2, с. 114]

$$\Delta h_{кам} = (\xi_{вх}' + \xi_{вих}') (w_{сер}^2 / 2g) \rho_{сер} \quad (6.5)$$

де  $\xi_{вх}' = 0,27$ ;  $\xi_{вих}' = 0,62$ ;  $F_{кам} = (\pi D_{\sigma}^2) / 4$ .

Швидкість газу в вихідному патрубку

$$w_{вих} = \frac{M}{\rho_{вих} F_{вих} \cdot 3600} \quad (6.6)$$

Втрати тиску (мм вод. ст.) на виході з газової камери

$$\Delta h_{вих} = \xi_{вих} (w_{вих}^2 / 2g) \rho_{вих} \quad (6.7)$$

Сумарні втрати тиску

$$\sum \Delta h = \Delta h_{вх} + \Delta h_{mp} + \Delta h_{кам} + \Delta h_{вих} \quad (6.8)$$

Загальна поправка на різницю густини повітря і газів за [2, с. 29;

4, с. 382]  $M_p = \rho_o / 1,293 = 1,26 / 1,293 = 0,975$ .

Повний опір газового тракту котла утилізатора

$$\Delta H = M_p \sum \Delta h \quad (6.9)$$

## ЛІТЕРАТУРА

1. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод.- Под ред. Н.В. Кузнецова и др. - М.: Энергия, 1973. - 295 с.
2. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод).- Госэнергоиздат, 1961.
3. Семененко Н.А., Куперман Л.И., Романовский С.А. и др. Вторичные энергетические ресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности. - Киев: Вища школа, 1979. - 296 с.
4. Лебедев П.Д., Щукин А.А. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. (Курсовое проектирование).- М.: Энергия, 1970.- 409 с.
5. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче.- М.: Энергия, 1969. - 263 с.
6. Краткий справочник по теплообменным аппаратам.- Под ред. П.Д. Лебедева. - М. - Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 256 с.
7. Герасимов Г.Г. Теоретичні основи теплотехніки. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2011. – 382 с.
8. Приходько М.А., Герасимов Г.Г. Термодинаміка та теплопередача. – Рівне: НУВГП, 2008. – 250 с.





## ДОДАТКИ

Таблиця 1

Середня кіломолярна теплоємність газів при постійному тиску  $\mu C_{pT}$   
кДж/(кмоль·град) в інтервалі температур 0... $t^{\circ}\text{C}$ .

$t, ^{\circ}\text{C}$	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Повітря
0	29,278	29,023	28,621	29,127	35,865	38,859	33,503	29,077
100	29,542	29,052	28,939	29,182	38,118	40,660	33,746	29,157
200	29,936	29,140	29,077	29,308	40,065	42,335	34,123	29,303
300	30,405	29,291	29,128	29,521	41,761	43,884	34,580	29,525
400	30,882	29,504	29,190	29,793	43,256	45,224	35,095	29,793
500	31,338	29,768	29,253	30,103	44,579	46,396	35,635	30,099
600	31,766	30,049	29,320	30,430	45,760	47,360	36,200	30,409
700	32,155	30,346	29,412	30,756	46,819	48,239	36,795	30,727
800	32,507	30,639	29,521	31,075	47,770	48,951	37,398	31,033
900	32,829	30,928	29,651	31,380	48,624	49,621	38,013	31,326
1000	33,122	31,200	29,793	31,669	49,399	50,165	38,624	31,602
1100	33,390	31,460	29,948	31,941	50,106	50,668	39,232	31,866
1200	33,637	31,711	31,111	32,197	50,747	51,086	39,830	32,113
1300	33,868	31,946	30,292	32,431	51,329	-	40,412	32,348
1400	34,081	32,168	30,472	32,658	51,865	-	40,482	32,570
1500	34,286	32,377	30,652	32,863	52,355	-	41,531	32,779
1600	34,479	32,570	30,836	33,055	52,807	-	42,062	32,971
1700	34,663	32,754	31,016	33,236	53,226	-	42,582	33,156
1800	34,839	32,921	31,196	33,407	53,611	-	43,076	33,323
1900	35,011	33,085	31,376	33,566	53,967	-	43,545	33,487
2000	35,174	33,235	31,552	33,713	54,298	-	44,001	33,646
2100	35,333	33,382	31,728	33,855	54,604	-	44,399	33,792
2200	35,488	33,520	31,895	33,985	54,888	-	44,860	33,931
2300	35,639	33,646	32,063	34,110	55,152	-	45,262	34,064
2400	35,790	33,683	32,226	34,228	55,399	-	45,651	34,190
2500	35,932	33,880	32,389	34,341	55,625	-	46,023	34,311
2600	36,074	34,180	32,544	34,480	56,350	-	46,388	34,450
2700	36,212	34,290	32,695	34,580	56,580	-	46,736	34,560
2800	36,360	34,390	32,870	34,680	56,820	-	47,066	34,670
2900	36,480	34,490	33,010	34,770	57,040	-	47,384	34,770
3000	36,610	34,580	33,160	34,860	57,230	-	-	34,870



Фізичні параметри сухого повітря при атмосферному тиску (0,101 МПа)

Температура		Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплоємність $C_p$ , кДж/(кг·К)	Теплопровідність $\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	Температуропровідність $a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Число Прандтля Pr
К	t°С						
223	-50	1,584	1,013	2,040	12,7	9,23	0,728
233	-40	1,515	1,013	2,120	13,8	10,04	0,728
243	-30	1,453	1,013	2,200	14,9	10,80	0,723
253	-20	1,395	1,009	2,280	16,2	12,79	0,716
263	-10	1,342	1,009	2,360	17,4	12,43	0,712
273	0	1,293	1,005	2,442	18,8	13,28	0,707
283	10	1,247	1,005	2,510	20,0	14,26	0,705
293	20	1,205	1,005	2,590	21,4	15,06	0,703
303	30	1,165	1,005	2,670	22,9	16,00	0,701
313	40	1,128	1,005	2,760	24,3	16,96	0,699
323	50	1,093	1,005	2,826	25,7	17,95	0,698
333	60	1,060	1,005	2,900	27,2	18,97	0,696
343	70	1,029	1,009	2,960	28,2	20,02	0,694
353	80	1,000	1,009	3,050	30,2	21,09	0,693
363	90	0,972	1,009	3,130	31,9	22,10	0,690
373	100	0,946	1,009	3,210	33,6	23,13	0,688
393	120	0,898	1,009	3,340	36,8	25,45	0,686
413	140	0,854	1,013	3,490	40,3	27,80	0,684
433	160	0,815	1,017	3,640	43,9	30,09	0,682
453	180	0,779	1,022	3,780	47,5	32,49	0,681
473	200	0,740	1,026	3,931	51,4	34,85	0,680
523	250	0,674	1,038	4,268	61,0	40,61	0,677
573	300	0,615	1,047	4,605	71,6	48,33	0,674
623	350	0,566	1,059	4,908	81,9	55,46	0,676
673	400	0,524	1,068	5,210	93,1	63,09	0,678
773	500	0,456	1,093	5,745	115,3	79,38	0,687
873	600	0,404	1,114	6,222	138,3	96,89	0,699
973	700	0,362	1,135	6,710	163,4	115,40	0,706
1073	800	0,329	1,156	7,176	188,7	134,80	0,713
1173	900	0,301	1,172	7,629	216,2	155,10	0,717
1273	1000	0,277	1,185	8,071	245,9	177,10	0,719
1373	1100	0,257	1,197	8,502	276,3	199,30	0,722
1473	1200	0,239	1,210	9,153	316,5	223,70	0,724



Фізичні параметри димових газів при атмосферному тиску  
(0,101 МПа), Склад газів: CO<sub>2</sub>=13%; H<sub>2</sub>O=11%; N<sub>2</sub>=76%

Температура		Густи- на $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплос- мність $C_p$ , кДж/(м <sup>3</sup> · К)	Тепло- провід- ність $\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	Темпе- ра- туро- ро- відність $\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Коефіці- єнт кінема- тичної в'язкості $\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Число Пран дтля Pr
К	°С						
273	0	1,295	1,3562	2,280	16,9	12,20	0,72
373	100	0,950	1,3712	3,129	30,6	21,54	0,69
473	200	0,748	1,3875	4,012	48,9	32,80	0,67
573	300	0,617	1,4057	4,838	69,9	45,81	0,65
673	400	0,525	1,4234	5,699	94,3	60,38	0,64
773	500	0,457	1,4424	6,559	121,1	76,30	0,63
873	600	0,405	1,4315	7,420	150,9	93,61	0,62
973	700	0,363	1,4807	8,268	183,8	112,10	0,61
1073	800	0,330	1,4994	9,153	219,7	131,80	0,60
1173	900	0,301	1,5170	10,013	258,0	152,50	0,59
1273	1000	0,275	1,5337	10,897	303,4	174,30	0,58
1373	1100	0,257	1,5496	11,746	345,5	197,10	0,57
1473	1200	0,240	1,5646	12,319	392,4	221,00	0,56

Таблиця 4

Нижня теплота згоряння газів

Найменування газу	Позна- чення	Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$Q_n^p$ , ккал/м <sup>3</sup>	$Q_n^p$ , кДж/м <sup>3</sup>
Водень	H <sub>2</sub>	0,09	2579	10797
Азот елементарний	N <sub>2</sub>	1,251	-	-
Кисень	O <sub>2</sub>	1,428	-	-
Окис вуглецю	CO	1,25	3018	12635
Вуглекислий	CO <sub>2</sub>	1,964	-	-
Сірчистий	SO <sub>2</sub>	2,858	-	-
Сірководень	H <sub>2</sub> S	1,52	5585	23383
Метан	CH <sub>4</sub>	0,716	8555	35818
Етан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,342	15226	63748
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,967	21795	91251
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2,593	28338	118645
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3,218	34890	140077
Етилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,251	14107	59063
Пропілен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1,877	20541	86001
Бутилен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2,503	27111	113508
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	3,485	38528	140375



Фізичні властивості води на лінії насичення

$t$ , °C	$p$ , бар	$\rho$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$h'$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$c_p$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$	$\lambda \cdot 10^2$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$	$a \cdot 10^6$ , $\text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6$ , $\text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4$ , $\frac{1}{\text{K}}$	$\sigma \cdot 10^4$ , Н/м	Pr
0	0,006	999,9	0,00	4,212	55,1	13,1	1,789	-0,63	756,1	13,67
10	0,012	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1,306	0,70	742,0	9,52
20	0,023	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1,006	1,82	728,3	7,02
30	0,042	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	0,805	3,21	712,2	5,42
40	0,073	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	0,659	3,87	696,3	4,31
50	0,123	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	0,556	4,49	676,9	3,54
60	0,199	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	0,478	5,11	662,2	2,98
70	0,312	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	0,415	5,70	643,5	2,55
80	0,473	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	0,365	6,32	625,9	2,21
90	0,701	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	0,326	6,95	609,2	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	0,252	8,64	549,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	0,233	9,19	529,0	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	0,217	9,72	507,1	1,26
150	4,76	917,0	633,2	4,313	68,4	17,3	0,203	10,3	488,6	1,17
160	6,18	907,4	676,1	4,346	68,3	17,3	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	712,3	4,380	67,9	17,3	0,181	11,3	443,5	1,05
180	10,03	886,9	758,0	4,417	67,4	17,2	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,55	886,0	792,3	4,459	67,0	17,1	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	836,1	4,505	66,3	17,0	0,158	13,3	376,1	0,93
210	19,08	852,8	876,5	4,555	65,5	16,9	0,153	14,1	354,7	0,91
220	23,20	840,3	912,3	4,614	64,5	16,6	0,149	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	954,6	4,681	63,7	16,4	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,48	813,6	997,2	4,756	62,8	16,2	0,141	16,3	285,5	0,87
250	39,78	799,0	1050,6	4,844	61,8	15,9	0,137	18,1	265,9	0,86
260	46,94	781,5	1103,1	4,949	60,5	15,6	0,135	19,7	237,4	0,87
270	55,05	767,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	13,8	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,9	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	0,128	38,2	98,10	1,11
330	128,65	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,08	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	0,127	53,4	56,7	1,39
350	165,37	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,38	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,34	538,0	1761,5	13,98	39,5	5,36	0,126	109	20,21	2,35
370	210,53	450,5	1892,5	40,32	33,7	1,86	0,126	264	4,71	6,79



Фізичні властивості водяної пари на лінії насичення

$t$ , °C	$p$ , бар	$\rho''$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$h''$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$r$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$c_p$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^6$ , $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$v \cdot 10^6$ , $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	Pr
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,375	18,58	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,3	2,395	2,884	4,728	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,538	3,128	2,939	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	2,93	1,25
190	12,55	6,397	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2798,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	2,03	1,36
210	19,09	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,2	1765,6	3,881	4,291	0,658	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801,1	1715,8	4,158	4,512	0,544	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796,5	1661,4	4,468	4,803	0,453	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2789,8	1604,4	4,815	5,106	0,378	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2779,7	1542,9	5,234	5,489	0,317	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766,4	1476,3	5,694	5,827	0,261	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749,2	1404,3	6,280	6,268	0,216	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727,4	1325,2	7,118	6,838	0,176	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700,2	1238,1	8,206	7,513	0,141	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2665,9	1139,7	9,881	8,257	0,108	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2621,9	1027,1	12,35	9,304	0,0811	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564,5	893,5	16,24	10,70	0,0580	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2481,2	719,7	23,03	12,79	0,0396	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2330,9	438,4	56,52	17,10	0,0150	0,166	11,10



Параметри сухої насиченої пари і води на лінії насичення (за тиском)

$p$ , МПа	$t_w$ , °C	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
0,0010	6,936	0,0010001	130,04	29,18	2513,4	0,1053	8,9749
0,0015	13,001	0,0010007	88,38	54,61	2524,7	0,1952	8,8268
0,0020	17,486	0,0010014	67,24	73,40	2533,1	0,2603	8,7227
0,0025	21,071	0,0010021	54,42	88,36	2539,5	0,3119	8,6424
0,0030	24,078	0,0010028	45,77	100,93	2545,3	0,3547	8,5784
0,0035	26,674	0,0010035	39,56	111,81	2549,9	0,3912	8,5222
0,0040	28,95	0,0010042	34,93	121,33	2553,7	0,4225	8,4737
0,005	32,89	0,0010054	28,24	137,79	2560,9	0,4764	8,3946
0,010	45,82	0,0010102	14,70	191,84	2583,9	0,6496	8,1494
0,020	60,08	0,0010171	7,652	251,48	2609,2	0,8324	7,9075
0,025	64,99	0,0010198	6,201	272,03	2617,6	0,8334	7,8300
0,030	69,12	0,0010223	5,232	289,30	2624,6	0,9441	7,7673
0,04	75,87	0,0010264	3,999	317,62	2636,3	1,0261	7,6710
0,05	81,33	0,0010299	3,243	340,53	2645,2	1,0912	7,5923
0,10	99,62	0,0010432	1,696	417,47	2674,9	1,3026	7,3579
0,20	120,23	0,0010606	0,8860	504,74	2706,8	1,5306	7,1279
0,3	133,54	0,0010733	0,6055	561,7	2725,5	1,6716	6,9922
0,5	151,84	0,0010927	0,3749	640,1	2748,8	1,8605	6,8221
0,6	158,84	0,0011009	0,3156	670,6	2756,9	1,9311	6,7609
0,7	164,96	0,0011081	0,2728	697,2	2763,7	1,9923	6,7090
0,8	170,41	0,0011149	0,2403	720,9	2769,0	2,0461	6,6630
0,9	175,36	0,0011213	0,2149	742,7	2773,7	2,0945	6,6223
1,0	179,88	0,0011273	0,1945	762,4	2777,8	2,1383	6,5867
1,5	198,28	0,0011538	0,1317	844,5	2791,8	2,3148	6,4458
2,0	212,37	0,0011768	0,09961	908,6	2799,2	2,4471	6,3411
3,0	233,83	0,0012164	0,06663	1008,4	2803,1	2,6455	6,1859
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	1087,5	2800,6	2,7965	6,0689
5,0	263,91	0,0012858	0,03943	1154,2	2793,9	2,9210	5,9739
6,0	275,56	0,0013185	0,03243	1213,9	2784,4	3,0276	5,8894
7,0	285,80	0,0013510	0,02738	1267,6	2772,3	3,1221	5,8143
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	1317,3	2758,6	3,2079	5,7448
9,0	303,31	0,0014174	0,02049	1363,9	2742,6	3,2866	5,6783
10,0	310,96	0,0014522	0,01803	1407,9	2724,8	3,3601	5,6147
12,0	324,64	0,001527	0,01426	1491,1	2684,6	3,4966	5,4930
14,0	336,63	0,001611	0,01149	1570,8	2637,9	3,6233	5,3731
16,0	347,32	0,001710	0,00932	1649,6	2581,7	3,7456	5,2478
18,0	356,96	0,001836	0,00750	1732,2	2510,6	3,8708	5,1054
20,0	365,72	0,002030	0,00586	1826,8	2410,3	4,0147	4,9280
22,0	373,71	0,00269	0,00378	2009,7	2195,6	4,2943	4,5815



Параметри сухої насиченої пари і води на лінії насичення (за температурою)

$t_n$ , °C	$p$ , МПа	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,000	2500,8	0	9,1544
5	0,0008718	0,0010001	147,2	21,06	2510,0	0,0762	9,0242
10	0,0012271	0,0010004	106,42	42,04	2519,2	0,1511	8,8995
15	0,001704	0,0010010	77,97	62,97	2528,4	0,2244	8,7806
20	0,002337	0,0010018	57,84	83,90	2537,2	0,2964	8,6663
25	0,003167	0,0010030	43,40	104,80	2546,4	0,3672	8,5570
30	0,004241	0,0010044	32,93	125,69	2555,6	0,4367	8,4523
35	0,005622	0,0010060	25,25	146,58	2564,8	0,5049	8,3518
40	0,007375	0,0010079	19,55	167,51	2573,6	0,5723	8,2560
45	0,009582	0,0010099	15,28	188,41	2582,4	0,6385	8,1638
50	0,012335	0,0010121	12,05	209,30	2591,6	0,7038	8,0751
55	0,015741	0,0010145	9,578	230,19	2600,4	0,7679	7,9901
60	0,01992	0,0010171	7,678	251,12	2609,2	0,8311	7,9084
65	0,02501	0,0010199	6,201	272,06	2617,6	0,8935	7,8297
70	0,03116	0,0010228	5,045	292,99	2626,4	0,9550	7,7544
75	0,03855	0,0010258	4,133	313,97	2634,8	1,0157	7,6819
80	0,04736	0,0010290	3,409	334,94	2643,1	1,0752	7,6116
85	0,05780	0,0010324	2,828	355,96	2651,5	1,1342	7,5438
90	0,07011	0,0010359	2,361	376,98	2659,5	1,1924	7,4785
95	0,08452	0,0010396	1,982	398,04	2667,8	1,2502	7,4157
100	0,10132	0,0010435	1,673	419,10	2675,8	1,3071	7,3545
105	0,12080	0,0010474	1,419	440,20	2683,3	1,3632	7,2959
110	0,14327	0,0010515	1,210	461,34	2691,3	1,4185	7,2386
115	0,16906	0,0010558	1,037	482,53	2698,8	1,4725	7,1833
120	0,19854	0,0010603	0,8917	503,7	2706,3	1,5278	7,1289
125	0,23208	0,0010649	0,7704	525,0	2713,5	1,5814	7,0778
130	0,27011	0,0010697	0,6683	546,4	2720,6	1,6345	7,0271
135	0,3130	0,0010747	0,5820	567,7	2727,3	1,6869	6,9781
140	0,3614	0,0010798	0,5087	589,1	2734,0	1,7392	6,9304
145	0,4155	0,0010851	0,4461	610,4	2740,3	1,7907	6,8839
150	0,4760	0,0010906	0,3926	632,2	2746,5	1,8418	6,8383
155	0,5433	0,0010962	0,3465	653,6	2752,4	1,8924	6,7939
160	0,6180	0,0011021	0,3068	675,3	2757,8	1,9427	6,7508
165	0,7008	0,0011081	0,2725	697,5	2763,7	1,9925	6,7081
170	0,7920	0,0011144	0,2426	719,3	2768,7	2,0419	6,6666
175	0,8925	0,0011208	0,2166	741,1	2773,3	2,0909	6,6256
180	1,0027	0,0011275	0,1939	763,3	2778,4	2,1395	6,5858
185	1,1234	0,0011344	0,1739	35,4	2782,5	2,1876	6,5465



$t_w$ , °C	$p$ , МПа	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)
190	1,2553	0,0011415	0,1564	807,6	2786,3	2,2358	6,5075
195	1,3989	0,0011489	0,1409	829,8	2789,7	2,2835	6,4699
200	1,5550	0,0011565	0,1272	852,4	2793,0	2,3308	6,4318
205	1,7245	0,0011644	0,1150	875,0	2795,5	2,3777	6,3945
210	1,9080	0,0011726	0,1044	897,6	2798,0	2,4246	6,3577
215	2,1062	0,0011812	0,09465	920,7	2800,1	2,4715	6,3212
220	2,3202	0,0011900	0,08606	943,7	2801,4	2,5179	6,2848
225	2,5504	0,0011992	0,07837	967,2	2802,6	2,5640	6,2488
230	2,7979	0,0012087	0,07147	990,2	2803,1	2,6101	6,2132
235	3,0635	0,0012187	0,06527	1014,0	2803,4	2,6561	6,1780
240	3,3480	0,0012291	0,05967	1037,5	2803,1	2,7022	6,1425
245	3,6524	0,0012399	0,05462	1061,8	2802,6	2,7478	6,1073
250	3,978	0,0012512	0,05005	1086,1	2801,0	2,7934	6,0721
255	4,325	0,0012631	0,04591	1110,3	2788,9	2,8395	6,0365
260	4,694	0,0012755	0,04215	1135,0	2796,4	2,8851	6,0014
265	5,088	0,0012886	0,03872	1160,2	2793,4	2,9308	5,9658
270	5,505	0,0013123	0,03560	1185,3	2789,7	2,9764	5,9298
275	5,949	0,0013168	0,03275	1210,8	2785,1	3,0225	5,8938
280	6,419	0,0013321	0,03013	1236,8	2779,6	3,0685	5,8578
285	6,918	0,0013483	0,02774	1263,2	2773,3	3,1146	5,8201
290	7,445	0,0013655	0,02553	1290,0	2766,2	3,1610	5,7824
295	8,002	0,0013839	0,02351	1317,2	2758,3	3,2079	5,7445
300	8,592	0,0014036	0,02164	1344,8	2749,1	3,2548	5,7049
305	9,213	0,001425	0,01992	1373,3	2739,0	3,3025	5,6647
310	9,869	0,001447	0,01831	1402,2	2727,3	3,3507	5,6233
315	10,561	0,001472	0,01683	1431,9	2714,3	3,3997	5,5802
320	11,290	0,001499	0,01545	1462,0	2699,6	3,4495	5,5354
325	12,057	0,001529	0,01417	1493,4	2683,3	3,5002	5,4893
330	12,864	0,001562	0,01297	1526,1	2665,7	3,5521	5,4412
335	13,715	0,001599	0,01184	1559,6	2645,2	3,6057	5,3905
340	14,608	0,001639	0,01078	1594,8	2621,8	3,6605	5,3361
345	15,547	0,001686	0,09771	1632,0	2595,4	3,7183	5,2770
350	16,537	0,001741	0,08805	1671,4	2564,4	3,7786	5,2117
355	17,577	0,001807	0,007869	1714,1	2527,2	3,8439	5,1385
360	18,674	0,001894	0,006943	1761,4	2481,1	3,9163	5,0530
365	19,830	0,00202	0,00600	1817,5	2420,8	4,0009	4,9463
370	21,053	0,00222	0,00493	1892,4	2330,8	4,1135	4,7951
375	22,087	0,00280	0,00361	2031,9	2171,7	4,3258	4,5418





Національний університет  
водного господарства  
та природокористування



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування