

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування
Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики
та гідравлічних машин

01-06-58М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи
«Розрахунок спірального теплообмінника»
з навчальної дисципліни «Енергоощадність в теплоенергетиці»
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за
освітньо-професійною програмою «Теплоенергетика»
спеціальності 144 «Теплоенергетика»
денної, заочної та дистанційної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з якості
ННІВГП
Протокол № 7 від 16.02.2021 р.

Рівне – 2021

1. Загальні відомості і вихідні дані для розрахунку

Спіральні теплообмінники знаходять широке застосування в різних галузях промисловості. Вони виготовляються відповідно до побажань замовника для використання в якості нагрівників, охолоджувачів, рекуператорів, конденсаторів або випарників. Спіральні теплообмінники ідеально підходять для роботи з «проблемними рідинами», такими, як стічні води, гідросуміші, в'язкі рідини, рідини з волокнами і твердими частинками, а також там, де рідини повинні конденсуватися або випаровуватися при низьких перепадах тиску.

До конструкції теплообмінних апаратів пред'являють ряд вимог: вони повинні відрізнятися простотою, зручністю монтажу і ремонту. У ряді випадків конструкція теплообмінника повинна забезпечувати за можливістю менше забруднення поверхні теплообміну і бути легко доступною для огляду і ремонту.

Цім вимогам відповідають спіральні теплообмінники, в яких поверхня теплообміну утворюється двома листами, які скручені у спіралі і утворюють два спіральних прямокутних канали, по яким рухаються теплоносії. Внутрішні кінці спіралей закінчуються роздільною перегородкою – керном. Для придання спіралі жорсткості і фіксації відстані між ними слугують металеві прокладки. Система каналів закрита з торців кришками.

Переваги спіральних теплообмінників:

- компактність;
- можливість пропускання обох теплоносіїв з високими швидкостями, що забезпечує великий коефіцієнт теплопередачі;
- малий гідравлічний опір порівняно з іншими типами поверхневих теплообмінників;

Недоліками спіральних теплообмінників є:

- складність виготовлення і ремонту;
- придатність для роботи під надлишковим тиском не більше 0,6 МПа.

Спіральні теплообмінники використовують як для теплообміну між двома рідкими теплоносіями, так і для теплообміну між парою, що конденсується, і рідиною.

В якості гріючого агента в теплообмінниках часто використовують насичену водяну пару, яка має цілий ряд позитивних якостей:

- високий коефіцієнт тепловіддачі;
- велика кількість тепла, яке виділяється при конденсації пари;
- рівномірність обігріву, тому що конденсація пари відбувається при постійній температурі;
- легке регулювання обігріву.

При охолодженні в теплообмінниках в якості холодоагенту може використовуватися річкова або артезіанська вода, а у випадку, коли необхідно отримати температуру нижче 5°C , застосовують холодильні розсоли (водні розчини CaCl_2 , NaCl та ін.).

2. Завдання

Виконати розрахунок спірального теплообмінника для охолодження заданої рідини при масовій витраті G_1 ($m/год$) від температури кипіння $t_{1н}$ до кінцевої температури $t_{1к}$ за допомогою води з початкової температурою $t_{2н}$ і кінцевої температурою $t_{2к}$.

Чисельні значення вихідних даних визначаються за двома останніми цифрами залікової книжки (ЗК) згідно з таблицями 1 і 2.

Таблиця 1.

		Вихідні дані									
Остання цифра ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Рідина	Бензол	Спирт ізопропиловий	Спирт бутіловий	Спирт метиловий	Спирт етиловий 80%	Толуол	Етилацетат	Бензол	Спирт ізопропиловий	Толуол	
Хімічна формула	C_6H_6	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	$\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$	CH_3OH	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	$\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$	C_6H_6	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	
Масова витрата рідини G_1 , $m/год$	8	7	6	5	4	5	6	7	8	9	

Таблиця 2

Вихідні дані

Передостання цифра ЗК	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кінцева температура рідини $t_{1к}$, °С	25	30	35	20	22	27	24	20	23	28
Початкова температура води $t_{2н}$, °С	15	18	15	12	16	17	19	14	20	16
Кінцева температура води $t_{2к}$, °С	60	65	70	45	50	68	58	55	62	64

3. Вибір конструкційного матеріалу

Так як задана рідина є корозійно-активною речовиною, то в якості конструкційного матеріалу для основних деталей вибираємо нержавіючу сталь Х18Н10Т ГОСТ 5632-72, яка стійка до агресивних середовищ з температурами до 600 °С.

4. Технологічна схема

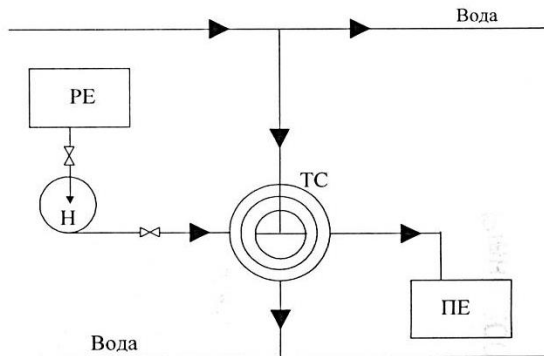


Рис. 1. Технологічна схема спірального теплообмінника

Задана рідина, за допомогою відцентрового насоса Н, подається в спіральний теплообмінник ТС, де охолоджується за рахунок нагрівання води, і потім самопливом поступає в прийма-

льну ємність ПЕ. Вода, що виходить з теплообмінника, скидається в каналізацію або використовується в якості оборотної.

5. Технологічний розрахунок

5.1 Середня різниця температур

Температура кипіння заданої речовини $t_{1н}$ визначається з таблиці [1, с. 541] або з таблиці А.1 додатка А.

Приймаємо протитечійний режим руху теплоносіїв, тоді більша різниця температур

$$\Delta t_{\bar{o}} = t_{1н} - t_{2к}, \quad (1)$$

а менша різниця

$$\Delta t_{\bar{м}} = t_{1к} - t_{2н}. \quad (2)$$

Відношення $\Delta t_{\bar{o}}/\Delta t_{\bar{м}} =$ отже, середня рушійна сила процесу (середня логарифмічна різниця температур)

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{o}} - \Delta t_{\bar{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{o}}}{\Delta t_{\bar{м}}}}. \quad (3)$$

Середня температура води

$$t_{2cp} = (t_{2н} + t_{2к})/2. \quad (4)$$

Середня температура заданої рідини

$$t_{1cp} = t_{2cp} + \Delta t_{cp}. \quad (5)$$

5.2 Теплове навантаження апарату

Кількість теплоти, яка віддається заданою рідиною, становить

$$Q = G_1 c_1 (t_{1н} - t_{1к}), \quad (6)$$

де c_1 – теплоємність бензолу при температурі t_{1cp} [1, с. 562], або за рисунком А.1 додатка А; G_1 – масова витрата заданої рідини, кг/с.

5.3 Витрата води з теплового балансу

$$G_2 = Q/[c_2(t_{2к} - t_{2н})], \quad (7)$$

де $c_2 = 4,19$ кДж/кг – теплоємність води.

5.4 Розмір каналів

Задаємося швидкістю руху заданої рідини $w_1 = 1$ м/с, тоді площа поперечного перерізу каналу

$$S_1 = G_1 / (\rho_1 w_1), \quad (8)$$

де ρ_1 – густина заданої рідини залежно від їх середньої температури t_{1cp} [1, с. 512], або таблиці А.2 додатка А.

Ширину каналів b_1 вибираємо з ряду значень 10, 12, 14, 16 мм, тоді висота стрічки повинні бути

$$h = S_1 / b_1. \quad (9)$$

Згідно з ГОСТ 12067-80 висота стрічки повинна відповідати таким значенням 400; 500; 700; 1000; 1100; 1250 мм.

Товщина стрічки δ приймається з ряду 3,5; 3,9; 4,0; 6,0 мм пропорційно висоті стрічки.

Ширина другого каналу приймається однаково з першим каналом, тобто $b_2 = b_1$.

5.5 Коефіцієнт тепловіддачі від заданої рідини до стінки

Еквівалентний діаметр прямокутного каналу

$$d = 4R = 4bh / [2(b+h)] = 2bh / (b+h). \quad (10)$$

Швидкість руху заданої рідини

$$w_1 = G_1 / (bh\rho_1). \quad (11)$$

Критерій Рейнольдса

$$Re_1 = w_1 d \rho_1 / \mu_1, \quad (12)$$

де μ_1 – коефіцієнт динамічної в'язкості заданої рідини [1, с. 516] або таблиця А.3. додатка А залежно від середньої температури t_{1cp} .

Критерій Нусельта

$$Nu_1 = 0,021 Re_1^{0,8} Pr_1^{0,43} (Pr_1 / Pr_{cm1})^{0,25}. \quad (13)$$

Критерій Прандтля

$$Pr_1 = c_1 \mu_1 / \lambda_1, \quad (14)$$

де λ_1 – теплопровідність заданої рідини (Вт/(м·К)) [1, с. 561] або рис. А.2 додатку А.

Приймаємо в першому наближенні $(Pr_1 / Pr_{cm1})^{0,25} = 1$, знаходимо значення Nu_1 і визначаємо коефіцієнт теплопередачі (Вт/(м²·К))

$$\alpha_1 = Nu_1 \lambda_1 / d. \quad (15)$$

5.6 Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до води Швидкість руху води

$$w_2 = G_2 / (bh\rho_2), \quad (16)$$

де ρ_2 – густина води (кг/м^3), визначається з [1, с. 537] або таблиці Б.1 додатку Б залежно від середньої температури води t_{2cp} .

Критерій Рейнольдса

$$\text{Re}_2 = w_2 d \rho_2 / \mu_2, \quad (17)$$

де μ_2 – коефіцієнт динамічної в'язкості води ($\text{Па}\cdot\text{с}$), [1, с. 537] або з таблиці Б.1 додатку Б залежно від середньої температури води t_{2cp} .

Критерій Нусельта

$$\text{Nu}_1 = 0,021 \text{Re}_2^{0,8} \text{Pr}_2^{0,43} (\text{Pr}_2 / \text{Pr}_{cm2})^{0,25}$$

Критерій Прандтля Pr_2 визначається з [1, с. 537] або з таблиці Б.1 додатку Б залежно від середньої температури води t_{2cp} .

Приймаємо в першому наближенні $(\text{Pr}_2 / \text{Pr}_{cm2})^{0,25} = 1$, тоді коефіцієнт тепловіддачі ($\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$)

$$\alpha_2 = \text{Nu}_2 \lambda_2 / d, \quad (18)$$

де λ_2 – теплопровідність води, визначається з [1, с. 537] або з таблиці Б.1 додатку Б залежно від середньої температури води t_{2cp} .

5.7 Тепловий опір стінки

$$\Sigma \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + r_1 + r_2, \quad (19)$$

де λ_{cm} – теплопровідність нержавіючої сталі ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), яка визначається з [1, с. 529] або з таблиці В.1 додатку В; r_1, r_2 – теплові опори забруднень ($\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$), які визначаються з [1, с. 531] або з таблиці В.2 додатка В.

5.8 Коефіцієнт теплопередачі ($\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$)

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (20)$$

Уточнюємо значення коефіцієнта теплопередачі. Знаходимо температуру стінки:

$$t_{cm1} = t_{cp1} - K\Delta t_{cp}/\alpha_1, \quad (21)$$

$$t_{cm2} = t_{cp2} + K\Delta t_{cp}/\alpha_2. \quad (22)$$

Уточнюємо коефіцієнти тепловіддачі при відповідній температурі стінки, знаходячи критерії Прандтля $Pr_{1ст}$ і $Pr_{2ст}$ з таблиці Б.1 додатку Б, і використовуємо формули

$$\alpha_{1ym} = \alpha_1 (Pr_1 / Pr_{1cm})^{0,25}, \quad (23)$$

$$\alpha_{2cm} = \alpha_2 (Pr_2 / Pr_{2cm})^{0,25}. \quad (24)$$

Тоді уточнений коефіцієнт теплопередачі

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1ym}} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{2ym}}}. \quad (25)$$

Перевіряємо температуру стінки

$$t_{cm1} = t_{cp1} - K\Delta t_{cp}/\alpha_1, \quad (26)$$

$$t_{cm2} = t_{cp2} + K\Delta t_{cp}/\alpha_2. \quad (27)$$

З'ясувати, чи отримані значення близькі до раніш розрахованих в першому наближенні.

5.9 Поверхня теплообміну

$$F = Q / (K\Delta t_{cp}). \quad (28)$$

Згідно ГОСТ 12067-80 при площі теплообміну $F=20 \text{ м}^2$ ширина стрічки $h = 500 \text{ мм}$, а при площі теплообміну $F=50 \text{ м}^2$ ширина стрічки $h = 1100 \text{ мм}$. Приймаємо ширину стрічки і кількість теплообмінників відповідно з зазначеними прикладами виконання теплообмінників.

6. Конструктивний розрахунок

6.1 Довжина спіралі

$$l = F / (2h). \quad (29)$$

6.2 Розрахунок штуцерів

Приймаємо швидкість рідини в штуцері $w_{um} = 1 \text{ м/с}$.

Штуцер для входу і виходу заданої рідини

$$d_l = \sqrt{\frac{4G_1}{\pi w_{um} \rho_1}}. \quad (30)$$

Приймаємо діаметр штуцера d_1 стандартним, тобто найближчий більший до визначеного з сортаменту сталевих труб (40 або 65 мм).

Штуцер для входу і виходу води

$$d_2 = \sqrt{\frac{4G_2}{\pi w_{um} \rho_2}}. \quad (31)$$

Приймаємо діаметр штуцера d_1 аналогічно попереднім рекомендаціям.

6.3 Число витків спіралі

Крок спіралей (м)

$$y_1 = y_2 = b + \delta. \quad (32)$$

Приймаємо радіус піввитка з урахуванням штуцера $x=0,2$ м. Число піввитків першої спіралі

$$n_1 = \left(0,5 \frac{x}{y_2}\right) + \sqrt{\left(\frac{x}{y_2}\right)^2 + \frac{2l}{\pi \cdot y_2}}. \quad (33)$$

Число піввитків другої спіралі

$$n_2 = \left(\frac{y_1 - 0,5y_2 - x}{y_2}\right) + \sqrt{\left(\frac{x + 0,5y_2 - y_1}{y_2}\right)^2 + \frac{2l}{\pi \cdot y_2}}. \quad (34)$$

6.4 Діаметр апарата

$$D = 2 [x + (n_2 + 1)y_2 - y_1] + 2\delta \quad (35)$$

Приймаємо діаметр апарата близький до розмірів за ГОСТ 12067-80.

6.5 Вибір опор апарата

Маса теплообмінника

$$m = m_1 + m_6 + m_2, \quad (36)$$

де m_1 – маса спіралей, m_6 – маса води, яка заповнює апарат при гідро випробуванні; m_2 – маса допоміжних елементів (фланців, штуцерів)

$$m_1 = 2hl\delta\rho_{cm}, \quad (37)$$

де ρ_{cm} – густина сталі, $\rho_{cm} = 7900 \text{ кг/м}^3$, таблиця В.1 додатка В.

$$m_6 = (\pi D^2 h / 4 - 2hl\delta)\rho_6. \quad (38)$$

m_2 приймаємо 5% від основної ваги апарата. Тоді

$$m = 1,05(m_1 + m_2) \quad (39)$$

Приймаємо для апарата дві опори у вигляді лап. Навантаження на одну опору (кН)

$$G = m/2. \quad (40)$$

Вибираємо опору з допустимим навантаженням 6,3 кН, конструкція якої приводиться на рис. 2.

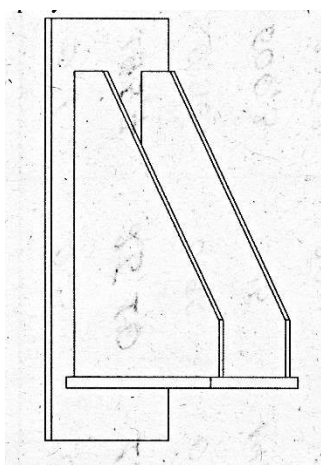


Рис. 2. Опора спірального теплообмінника

6.6 Ущільнення каналів

Кожний канал с однієї сторони заварюють, а з другої ущільнюють плоскою прокладкою, рис 3. Такий спосіб запобігає змішуванню теплоносіїв у випадку нещільності прокладки. Крім того, цей тип ущільнення дозволяє легко очистити канали при їх забрудненні.

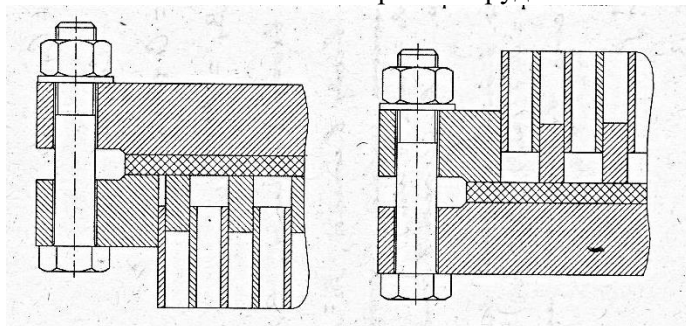


Рис. 3. Конструкція ущільнення спірального теплообмінника

7. Гідравлічний розрахунок

Задачею гідравлічного розрахунку є визначення гідралічного опору апарата і вибір насоса для подачі рідкого теплоносія.

7.1 Гідравлічний опір апарата для заданої рідини (Па)

$$\Delta P_1 = \lambda_{01} \frac{l w_1^2 \rho}{2d_{екв}} + 1,5 w_{1ум}^2 \rho. \quad (41)$$

Швидкість заданої рідини в штуцері

$$w_{1ум} = G_1 / (0,785 d_1^2 \rho_1), \quad (42)$$

Коефіцієнт тертя

$$\lambda_{01} = 856 / \text{Re}_1^{0,25}. \quad (43)$$

Тепер можливо знайти чисельне значення ΔP_1 за формулою (41)

7.2 Потрібний напір насоса:

$$H_1 = \Delta P_1 / (\rho_1 g) + h_r, \quad (44)$$

де h_r – геометрична висота підйому рідини і втрати напору в відповідному трубопроводі. Приймаємо $h_r = 3$ м.

Об'ємна секундна витрата розчину заданої речовини (м³/с)

$$Q_1 = G_1 / \rho_1. \quad (45)$$

За цими двома величинами вибираємо хімічний відцентровий насос марки з подачею $Q =$ м³/с і напором $H =$ м згідно з даними [3, с. 38] або згідно з таблицею Г.1 додатка Г.

7.3 Гідравлічний опір для води (Па)

Швидкість води в штуцері

$$w_{2ум} = G_2 / (0,785 d_2^2 \rho_2). \quad (46)$$

Коефіцієнт тертя

$$\lambda_2 = 856 / \text{Re}_2^{0,25}. \quad (47)$$

Гідравлічний опір води

$$\Delta P_2 = \lambda_2 \frac{l w_2^2 \rho}{2d_{екв}} + 1,5 w_{2ум}^2 \rho. \quad (48)$$

7.4 Необхідний напір для води

$$H_2 = \Delta P_2 / (\rho_2 g) + h_r. \quad (49)$$

Об'ємна секундна витрата води

$$Q_2 = G_2 / \rho_2. \quad (50)$$

По цих двох величинах вибираємо хімічний відцентровий насос марки з подачею $Q =$ м³/с і напором

$H=$ м згідно з даними [3, с. 38] або згідно з таблицею Г.1 додатка Г.

8. Розрахунок теплової ізоляції

Приймаємо температуру зовнішньої поверхні стінки t_{cn2} і температуру зовнішнього повітря $t_e = 18$ °С, тоді товщина скловолокнистої ізоляції

$$\delta_{из} = \frac{\lambda_{из} (t_{1н} - t_{cn2})}{\alpha_e (t_{cn2} - t_e)}, \quad (51)$$

де $\lambda_{из} = 0,09$ Вт/(м·К) – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу згідно з таблицею В.1 додатка В

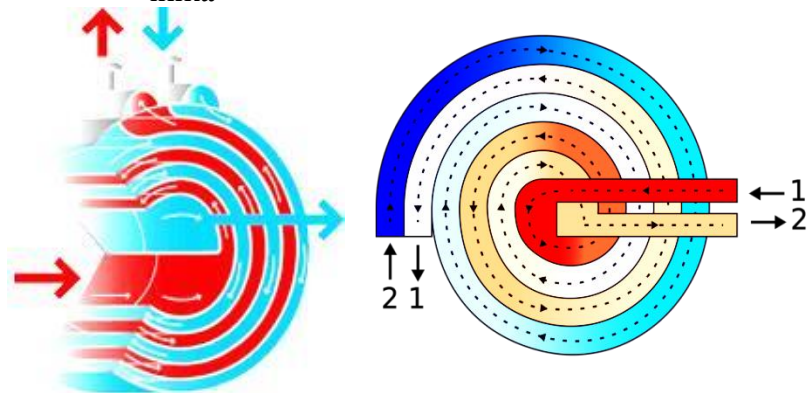
α_e – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої стінки до оточуючого середовища

$$\alpha_e = 8,4 + 0,06\Delta t_e, \quad (52)$$

де $\Delta t_e = t_{cn2} - t_e$.

Приймаємо товщину теплової ізоляції кратною 5 мм.

9. Приклади виготовлення спірального теплообмінника





ЛІТЕРАТУРА

1. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов. Л. : Химия, 1987. 576 с.
2. Спиральные теплообменники ГОСТ 12067-80.
3. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Под ред. Ю. И. Дытнерского. М. : Химия. 1983. 272 с.
4. Барановский Н. В., Коваленко Л. М., Ястребенецкий А. Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники. М. : Машиностроение, 1973. 288 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.

Додаток А

Фізичні властивості органічних рідин

Таблиця А.1

Фізичні властивості деяких органічних рідин

Перерахунок в СИ: 1 мм рт.ст. = 133,3 Па.

Рідина	Хімічна формула	Молекулярна маса, кг/кмоль	Густина, кг/м ³	Температура кипіння, °C	Тиск насиченої пари при 20 °C, мм рт.ст.	Температура плавлення °C
Ацетон	CH ₃ COCH ₃	58,08	810	56	186	-94,3
Бензин	-	-	690-760	70-120	-	-
Бензол	C ₆ H ₆	78,11	900	80,2	75	+5,5
Дихлоретан	CH ₂ Cl-CH ₂ Cl	98,97	1250	83,7	65	-
Ізопропилацетат	CH ₃ COOC ₃ H ₇	130,18	870	142,5	6	-
Ксилоли (суміш)	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	106,16	860	136-145	10	-13 -46
Метілацетат	CH ₃ COOCH ₃	74,08	930	57,5	170	-
Пропилацетат	CH ₃ COOC ₃ H ₇	102,13	890	101,6	25	-
Сірковуглець	CS ₂	76,13	1250	46,3	298	-112
Скипидар	C ₁₀ H ₁₆	136,1	850-880	155-190	4	-
Спирт бутиловий	C ₄ H ₉ OH	74,12	810	117,7	4,7	-90
Спирт ізоаміловий	C ₅ H ₁₁ OH	88,15	810	132	2,2	-117
Спирт ізобутиловий	C ₄ H ₉ OH	74,12	800	108	8,8	-108
Спирт ізопропиловий	C ₃ H ₇ OH	60,09	785	82,4	32,4	-99
Спирт метиловий	CH ₃ OH	32,04	800	61,7	95,7	-98
Спирт пропиловий	C ₃ H ₇ OH	60,09	800	97,2	14,5	-126
Спирт етиловий	C ₂ H ₅ OH	46,07	790	78,3	44	-114,5
Толуол	C ₆ H ₅ CH ₃	92,13	870	110,8	22,3	-95
Вуглець чотирихлористий	CCl ₄	153,84	1630	76,7	90,7	-22,8
Хлороформ	CHCl ₃	119,38	1530	61,2	160	-
Етилацетат	CH ₃ COOC ₂ H ₅	88,1	900	77,15	73	-83,6
Ефір діетиловий	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	74,12	710	34,5	442	-116,3

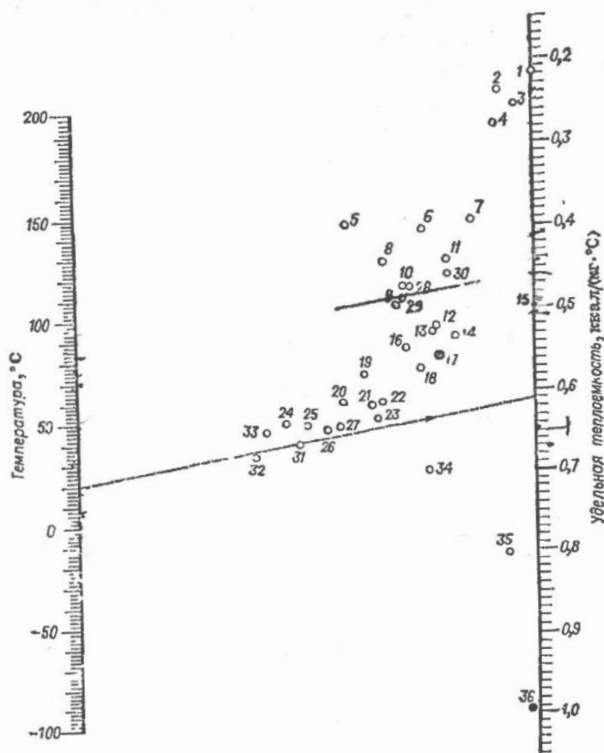


Рис. А.1. Номограма для визначення теплоємності рідин

Речовина	Номер точки	Речовина	Номер точки	Речовина	Номер точки
Амілацетат	12	Ізопропиловий спирт -50 0 °С	27	Хлористий кальцій, 25%	34
Анілін	14	Йодистий етил	5	Хлористий натрій, 25%	35
Ацетон	18	о- і м- Ксилол	9	Хлористий етил	11
Бензол	29	п- Ксилол	10		
Бромистий етил	1				
Бутиловий спирт	24	Метиловий спирт	23	Хлороформ	3
Вода	36	Октан	15	Чотирхлористий вуглець	2
Гептан	18	Пропиловий спирт	25	Етилацетат	13
Гліцерин	21	Сірчана кислота	7	Етиленгліколь	22
Дефініл	8	Сірковуглець	4		
Діетиловий ефір	17	Соляна кислота	26	Етиловий спирт	31
Ізобутиловий спирт	33	Толуол -60 40 °С	28		
Ізопентан	20	Толуол 40 100 °С	30		
Ізопропиловий спирт 0 50 °С	32	Оцтова кислота	16		
		Хлорбензол	6		

Таблиця А.2

Густина рідких речовин і водних розчинів в залежності
від температури [1, с. 512]

Речовина	Густина, кг/м ³							
	-20 °C	0 °C	20 °C	40 °C	60 °C	80 °C	100 °C	120 °C
Азотна кислота, 100%	1582	1547	1513	1478	1443	1408	1373	1338
« « , 80%	-	1334	1310	1287	1263	1238	1212	1186
Аміак рідкий	665	639	610	580	545	510	462	390
Аміачна вода, 25%	-	918	907	897	887	876	866	856
Анілін	-	1039	1022	1004	987	969	952	933
Ацетон	835	813	791	768	746	719	693	665
Бензол	-	900	879	858	836	815	793	769
Бутиловий спирт	838	834	810	795	781	766	751	735
Вода	-	1000	998	992	983	972	958	943
Гексан	693	677	660	641	622	602	581	559
Гліцерин, 50%	-	1136	1126	1116	1106	1006	996	986
Діоксид сірки (рід.)	1484	1434	1383	1327	1264	1193	1111	1010
Діхлоретан	1310	1282	1254	1224	1194	1163	1133	1102
Діетиловий ефір	758	736	714	689	666	640	611	576
Ізопропиловий спирт	817	801	785	763	752	735	718	700
Кальцій хлористий, 25% розчин м- Ксилол	1248	1239	1230	1220	1210	1200	1190	1180
Метиловий спирт, 100%	-	882	865	847	831	796	796	770
« « , 30%	828	810	792	774	756	736	714	-
« « , 20%	-	946	935	924	913	902	891	880
Мурашкова кислота	-	1244	1220	1195	1171	1147	1121	1096
Натр їдкий, 50% розчин	-	1540	1525	1511	1497	1483	1469	1454
« « , 40%	-	1443	1430	1416	1403	1389	1375	1360
« « , 30%	-	1340	1328	1316	1303	1289	1276	1261
« « , 20%	-	1230	1219	1208	1196	1183	1170	1155
« « , 10%	-	1117	1109	1100	1089	1077	1064	1049
Натрій хлористий, 20% роз	-	1157	1148	1189	1130	1120	1110	1100
Нітробензол	-	1223	1203	1183	1163	1143	1123	1103
Октан	734	718	702	686	669	653	635	617
Олеум, 20%	-	1922	1896	1870	1844	1818	1792	1766
Пропиловий спирт	-	819	804	788	770	752	733	711
Сірчана кислота, 98%	-	1857	1837	1817	1798	1779	1761	1742
« « , 92%	1866	1845	1824	1803	1783	1765	1744	1723
« « , 75%	1709	1689	1669	1650	1632	1614	1597	1580
« « , 60%	1532	1515	1498	1482	1466	1450	1434	1418
Сірководень	1323	1293	1263	1233	1200	1165	1125	1082
Соляна кислота, 30%	1173	1161	1149	1138	1126	1115	1103	1030
Толуол	902	884	866	847	828	808	788	766
Оцтова кислота, 100%	-	1072	1048	1027	1004	981	958	922
« « , 50%	-	1074	1058	1042	1026	1010	994	978
Фенол (розплавлений)	-	-	1075	1058	1040	1022	1003	987
Хлорбензол	1150	1128	1107	1085	1065	1041	1021	995
Хлороформ	1563	1526	1489	1450	1411	1380	1326	1280
Чотирихлористий вуглець	1670	1633	1594	1556	1517	1471	1434	1390
Етилацетат	947	924	901	876	851	825	797	768
Етиловий спирт, 100%	823	806	789	772	754	735	716	693
« « , 80%	-	857	843	828	813	797	783	768
« « , 60%	-	904	891	878	864	849	835	820
« « , 40%	-	947	935	923	910	897	885	872
« « , 20%	-	977	969	957	946	934	922	910

Таблиця А.3

Коефіцієнти динамічної в'язкості для рідких речовин
і водних розчинів

Речовина	-20 °С	0 °С	20 °С	40 °С	60 °С	80 °С	100 °С	120 °С
Азотна кислота, 100%	1,49	1,05	0,8	0,64	0,5	0,39	0,35	0,31
« « , 50%	-	3,05	1,88	1,26	0,9	0,68	0,53	0,44
Аміак рідкий	1,258	0,244	0,226	0,208	0,19	-	-	-
Аміачна вода, 25%	-	-	1,3	0,855	0,6	0,42	0,32	0,23
Анілін	-	10,2	4,4	2,3	0,5	1,1	0,8	0,59
Ацетон	0,5	0,395	0,322	0,268	0,23	0,2	0,17	0,15
Бензол	-	0,91	0,65	0,492	0,39	0,316	0,261	0,219
Бутиловий спирт	10,3	5,19	2,95	1,78	1,14	0,76	0,54	0,38
Вода	-	1,79	1,0	0,656	0,469	0,357	0,284	0,232
Гексан	0,479	0,397	0,32	0,264	0,221	0,19	0,158	0,132
Гліцерин, 50%	-	12	6,05	3,5	2	1,2	0,73	0,45
Діоксид сірки (рід.)	0,455	0,368	0,304	-	-	-	-	-
Дихлоретан	1,54	1,08	0,84	0,65	0,51	0,42	0,36	0,31
Діетиловий ефір	0,364	0,298	0,243	0,199	0,166	0,14	0,118	0,1
Ізопропиловий спирт	10,1	4,6	2,39	1,33	0,8	0,52	0,38	0,29
Кальцій хлористий, 25%	10,6	4,47	2,74	1,85	-	-	-	-
Метилловий спирт, 100%	1,16	0,817	0,584	0,45	0,351	0,29	0,24	0,21
« « , 40%	-	3,65	1,84	-	-	-	-	-
Муравлина кислота	-	-	1,78	1,22	0,89	0,65	0,54	0,4
Натр ідкий, 50%	-	-	-	25	8,03	5,54	3,97	3,42
« « , 40%	-	-	40	14	5,44	3,62	2,72	2,337
« « , 30%	-	-	13	6,3	3,4	2,16	1,82	1,71
« « , 20%	-	-	4,48	2,48	1,63	1,27	1,15	1,08
« « , 10%	-	-	1,86	1,16	0,91	0,7	0,65	0,6
Натрій хлористий, 20%	-	2,67	1,56	1,03	0,74	0,57	0,45	0,38
Нітробензол	-	3,09	2,01	1,44	1,09	0,87	0,7	0,58
Октан	0,968	0,703	0,54	0,438	0,35	0,291	0,245	0,208
Олеум, 20%	-	95	36,6	20,8	9	5,3	-	-
Сірчана кислота, 98%	-	55	25,8	12,9	7,5	4,1	2,7	2
« « , 92%	130	48	23,1	11,8	6,7	3,8	2,5	1,95
« « , 92%	95	30	13,9	8,1	4,6	2,8	1,9	1,45
« « , 92%	20	10,5	5,52	3,42	2,4	1,5	1,07	0,9
Сірковуглець	0,556	0,433	0,366	0,29	0,25	0,21	0,19	0,17
Соляна кислота, 30%	-	-	1,7	1,3	-	-	-	-
Толуол	1,06	0,768	0,586	0,466	0,38140,	0,319	0,271	0,231
Оцтова кислота, 100%	-	-	1,22	0,9	7	0,56	0,46	0,37
« « , 50%	-	4,35	2,21	1,35	0,92	0,65	0,5	0,4
Фенол розплавлений	-	-	11,6	4,77	2,56	1,59	1,05	0,78
Хлорбензол	1,48	1,06	0,8	0,64	0,52	0,435	0,37	0,32
Хлороформ	0,9	0,7	0,57	0,466	0,39	0,33	0,29	0,26
Чотирихлористий вуглець	1,9	1,35	0,97	0,74	0,59	0,472	0,387	0,323
Етилацетат	0,79	0,578	0,449	0,36	0,297	0,243	0,21	0,178
Етиловий спирт, 100%	2,38	1,78	1,19	0,825	0,591	0,435	0,326	0,2480,4
« « , 80%	-	3,69	2,01	1,2	0,79	0,57	0,52	3
« « , 60%	-	5,75	2,67	1,45	0,9	0,6	0,45	0,34
« « , 40%	-	7,14	2,91	1,48	0,89	0,6	0,44	0,34
« « , 20%	-	5,32	2,18	1,16	0,74	0,51	0,38	0,3

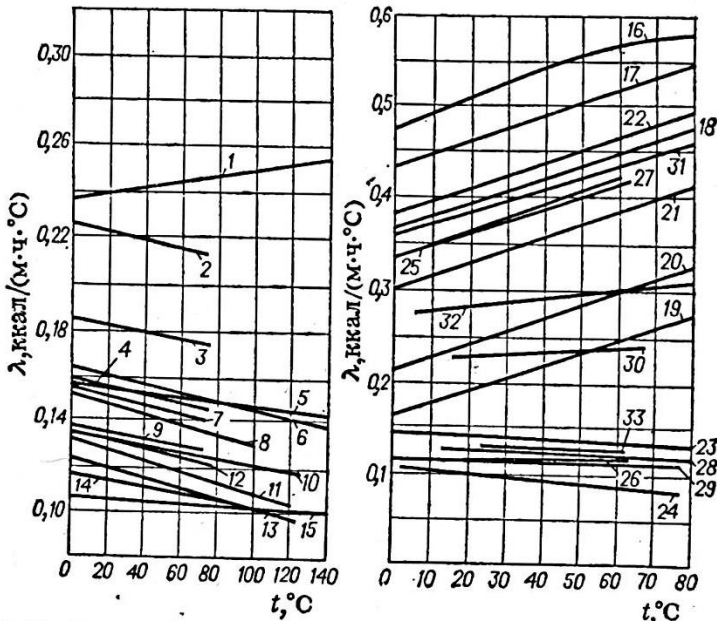


Рис. А.2. Коэффициенты теплопроводности деяких рідин

Речовина	Номер лінії	Речовина	Номер лінії	Речовина	Номер лінії
Аміак, 26%	31	Метилловий спирт, 100%	3	Хлористий натрій, 25%	18
Анілін	6	Те ж, 40%	32	Чотирхлористий вуглець	24
Ацетон	8	Мурашкова кислота	2	Етиловий спирт, 100%	4
Бензол	11			Етиловий спирт, 80%	19
Бутиловий спирт	9	Нітробензол	10	Етиловий спирт, 60%	20
Вазелінове масло	15	Октан	33		
Вода	16	Сірчана кислота 98%	30		
Гексан	26	Сірковуглець	23		
Гліцерин безводн « 50%	1				
Діетилловий ефір	29	Соляна кислота 30%	27	Етиловий спирт, 40%	21
Ізопропилловий спирт	12	Толуол	13	Етиловий спирт, 20%	22
Касторове масло	5	Оцтова кислота	7		
Керосин	28	Хлористий кальцій 25%	17		
Ксилол	14				

Перерахунок в СІ: 1 ккал/(м·ч·°C) = 1,163 Вт/(м·K)

Додаток Б

Фізичні властивості води

Таблиця Б.1

Фізичні властивості води на лінії насичення

t , °C	p , бар	ρ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	h' , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	c_p , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^6$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\nu \cdot 10^6$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\beta \cdot 10^4$, $\frac{1}{\text{К}}$	$\sigma \cdot 10^4$, 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

Додаток В

Коефіцієнти теплопровідності і тепловий опір

Таблиця В.1

Коефіцієнти теплопровідності деяких матеріалів
при 0 – 100 °С.

Матеріал	Густи- на, кг/м ³	Коефіцієнт теплопро- відності, Вт/(м·К)
Азбест	600	0,151
Бетон	2300	1,28
Винипласт	1380	0,163
Войлок шерстяний	300	0,047
Дерево (сосна) поперек волокон	600	0,14-0,174
« « вздовж волокон	600	0,384
Кладка зі звичайної цегли	1700	0,698-0,814
« « вогнетривкої цегли	1840	1,05*
« « ізолюючої цегли	600	0,116-0,209
Фарба масляна	-	0,233
Лід	920	2,33
Литво кам'яне	3000	0,098
Магnezія 85% в порошок	216	0,07
Накип, водяний камінь	-	1,163-3,49
Тирса деревна	230	0,07-0,093
Пінопласт	30	0,047
Пісок сухий	1500	0,349-0,814
Корковий дріб'язок	160	0,047
Іржа (окалина)	-	1,16
Совеліт	450	0,098
Скло	2500	0,698-0,814
Скляна вата	20	0,035-0,070
Текстоліт	1380	0,244
Торфоплити	220	0,064
Фаоліт	1730	0,419
Шлакова вата	250	0,076
Емаль	2,350	0,872-1,163
Метали		
Алюміній	2700	203,5
Бронза	8000	64,0
Латунь	8500	93,0
Мідь	8800	384
Свинець	11400	34,9
Сталь	7850	46,5
Сталь нержавіюча	7900	17,5
Чавун	7500	46,5-93,0

Примітка: * – при температурі 800-1100 °С;
для сипучих матеріалів наведена насипна густина.

Таблиця В.2

Середнє значення теплової провідності забруднених стінок

Теплоносії	Теплова провідність забруднених стінок $1/\tau_{\text{забр}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
Вода забруднена	1400-1860*
« середньої якості	1860-2900*
« гарної якості	2900-5800*
« очищена	2900-5800*
« дистильована	11600
Нафтопродукти чисті, масла, пари холодоагентів	2900
Нафтопродукти сирі	1160
Органічні речовини, розсоли, рідкі холодоагенти	5800
Водяна пара (з вміщенням масла)	5800
Органічна пара	11600
Повітря	2800

Примітка: * Для води менше значення теплової провідності забруднень відповідає більш високим температурам.

Основні характеристики насосів

Технічні характеристики відцентрових насосів, які використовуються в хімічній промисловості

Марка	Q , м ³ /с	H , м ст. рідини	n , с ⁻¹	η_n	тип	N_n , кВт	$\eta_{об}$
1	2	3	4	5	6	7	8
X2/25 X8/18	$4,2 \cdot 10^{-4}$ $2,4 \cdot 10^{-3}$	25	50	-	АОЛ 12-2	1,1	-
		11,3	48,3	0,4	АО2-31-2	3	-
		14,8 18			BAO-31-2	3	0,82
X8/30	$2,4 \cdot 10^{-3}$	17,7	48,3	0,50	АО2-32-2	4	-
		24			-	-	-
		30			BAO-32-2	4	0,83
X20/18	$5,5 \cdot 10^{-3}$	10,5	48,3	0,60	АО2-31-2	3	-
		13,8			-	-	-
		18			BAO-31-2	3	0,82
X20/31	$5,5 \cdot 10^{-3}$	48	48,3	0,55	АО2-41-2	5,5	0,87
		25			-	-	-
		31			BAO-41-2	5,5	0,84
X20/53	$5,5 \cdot 10^{-3}$	34,4	48,3	0,50	АО2-52-2	13	0,89
		44			-	-	-
		53			BAO-52-2	13	0,87
X45/21	$1,25 \cdot 10^{-2}$	13,5	48,3	0,60	АО2-51-2	10	0,88
		17,3			-	-	-
		21			BAO-51-2	10	0,87
X45/31	$1,25 \cdot 10^{-2}$	19,8	48,3	0,6	АО2-52-2	13	0,89
		25			-	-	-
		31			BAO-52-2	13	0,87
X45/54	$1,25 \cdot 10^{-2}$	32,6	48,3	0,60	АО2-62-2	17	0,88
		42			АО2-71-2	22	0,88
		54			АО2-72-2	30	0,89
X90/19	$2,5 \cdot 10^{-2}$	13	48,3	0,70	АО2-51-2	10	0,88
		16			АО2-52-2	13	0,89
		19			АО2-62-2	17	0,88
X90/33	$2,5 \cdot 10^{-2}$	25	48,3	0,70	АО2-62-2	17	0,88
		29,2			АО2-71-2	22	0,90
		33			АО2-72-2	30	0,90
X90/49	$2,5 \cdot 10^{-2}$	31,4	48,3	0,70	АО2-71-2	22	0,88
		40			АО2-72-2	30	0,9
		49			АО2-81-2	40	-

продовження таблиці Г.1

Марка	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$H, \text{ м ст. рідини}$	$n, \text{ с}^{-1}$	η_n	тип	$N_n, \text{ кВт}$	$\eta_{об}$		
1	2	3	4	5	6	7	8		
X90/85	$2,5 \cdot 10^{-2}$	50	48,3	0,65	АО2-81-2	40	-		
		70			АО2-82-2	55	-		
		85			АО2-90-2	75	0,89		
X/160/29/2	$4,5 \cdot 10^{-2}$	20	48,3	0,65	ВАО-72-2	30	0,89		
		24			АО2-72-2	30	0,89		
		29			АО2-81-2	40	-		
X160/49/2	$4,5 \cdot 10^{-2}$	33	48,3	0,75	АО2-81-2	40	-		
		40			АО2-82-2	55	-		
		49			АО2-91-2	75	0,89		
X160/29 X280/29	$4,5 \cdot 10^{-2}$	29	24,15	0,80	АО2-81-4	40	-		
	$8 \cdot 10^{-2}$	21			24,15	0,78	АО2-81-4	40	-
		25					АО2-82-4	55	-
		29					АО2-91-4	75	0,92
X280/42	$8 \cdot 10^{-2}$	29,6	24,15	0,70	АО2-91-4	75	0,92		
		35			-	-	-		
		42			АО2-92-4	100	0,93		
X280/72	$8 \cdot 10^{-2}$	51	24,15	0,70	АО-101-4	125	0,91		
		62			АО-102-4	160	0,92		
		72			АО-103-4	200	0,93		
X500/25	$1,5 \cdot 10^{-1}$	19	16	0,80	АО2-91-6	88	0,95		
		22			-	-	-		
		25			АО2-92-6	75	-		
X500/37	$1,5 \cdot 10^{-1}$	25	16	0,70	АО-102-6	125	0,92		
		31,2			-	-	-		
		37			АО-103-6	160	0,93		

Примітка: 1. Насоси призначені для перекачування хімічно активних і нейтральних рідин, які не мають включень або ж з твердими включеннями, що становлять до 0,02%, при розмірі частинок до 0,2 мм.

2. Кожний насос може бути виготовлені з трьома різними діаметрами робочого колеса, що відповідає трьом значенням напору в області оптимального ККД η_n .