

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до лабораторної роботи

**«ДОСЛІДЖЕННЯ ІЗОХОРНОГО ПРОЦЕСУ ЗМІНИ СТАНУ  
НАСИЧЕНОЇ І ПЕРЕГРІТОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ»**

для студентів спеціальностей 144 «Теплоенергетика»,  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
усіх форм навчання

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету  
протокол № 3 від 24. 10. 2024

Харків  
НТУ «ХПІ»  
2024

Методичні вказівки до лабораторної роботи «Дослідження ізохорного процесу зміни стану насиченої і перегрітої водяної пари» для студентів спеціальностей 144 «Теплоенергетика», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» усіх форм навчання/ уклад.: О. Р. Пересьолков, М. О. Тарасенко. – Харків: НТУ «ХП», 2024. – 20 с.

Укладачі:                    О. Р. Пересьолков  
   М. О. Тарасенко

Рецензент                    О. В. Круглякова

Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Як робоче тіло в енергетичних установках теплових електростанцій найбільшого поширення набула вода і водяна пара. Остання за своїми властивостями значно відрізняється від ідеального газу. Тому параметри водяної пари визначені експериментально та зведені в таблиці [1, 2] або представлені у вигляді діаграм стану  $P$ - $v$ ,  $T$ - $S$ ,  $i$ - $S$  та ін.

Розрізняють пару насичену та перегріту. Насичена пара буває сухою та вологою. Суха насичена пара не містить рідкої фази та має температуру  $t_n$ , яка дорівнює температурі кипіння, відповідну даному тиску  $P$ . Це стан пари, що знаходиться над поверхнею киплячої води, за відсутності в ній повітря і крапель рідини. Волога насичена пара – це суміш сухої насиченої пари й найдрібніших крапель води. Вміст води у вологій парі характеризується величиною ступеня сухості пари  $X$ . Параметри води (при  $X = 0$ ) та сухої насиченої пари (при  $X = 1$ ) в залежності від тиску наведені в табл. Д.І. Перегріта пара – це пара, температура  $t$  якої при даному тиску  $P$  більша за температуру насичення (кипіння)  $t_n$ .

Термодинамічні властивості води такі, що чим вищий тиск, то вища температура кипіння, тобто  $t_n = f(P)$ . Також при підвищенні тиску, при якому відбувається кипіння, зменшуються теплота пароутворення  $r$  і різниця значень питомого об'єму та густини води ( $v', \rho'$ ) та сухої насиченої пари ( $v'', \rho''$ ). За критичних параметрів  $v'_k = v''_k$ ;  $\rho'_k = \rho''_k$ . Критичний стан води характеризується параметрами:  $P_k = 221,29$  бар,  $t_k = 374,15$  °С,  $v_k = 0,0026$  м<sup>3</sup>/кг,  $i_k$ , кДж/кг,  $S_k$ , кДж/кг град.

На практиці зменшення різниці між густиною води та насиченої пари з підвищенням тиску обмежує застосування парогенераторів із природною циркуляцією води та пароводяної суміші в кип'ятильному контурі. Для виробництва пари з тиском  $P > 100$  бар використовують прямоточні парогенератори.

Теплота пароутворення для води за рівнянням Клапейрона-Клазіуса [3]:

$$r = T(v'' - v') \frac{dP}{dt} \quad (1)$$

Експериментально отримана залежність  $r = f(t_n)$  використовується у теплових розрахунках парогенераторів.

При ізохорному підведенні теплоти кипіння води відбувається зі збільшенням тиску та температури, що ілюструється графіком залежності  $P(t_n)$ , рис. 1.

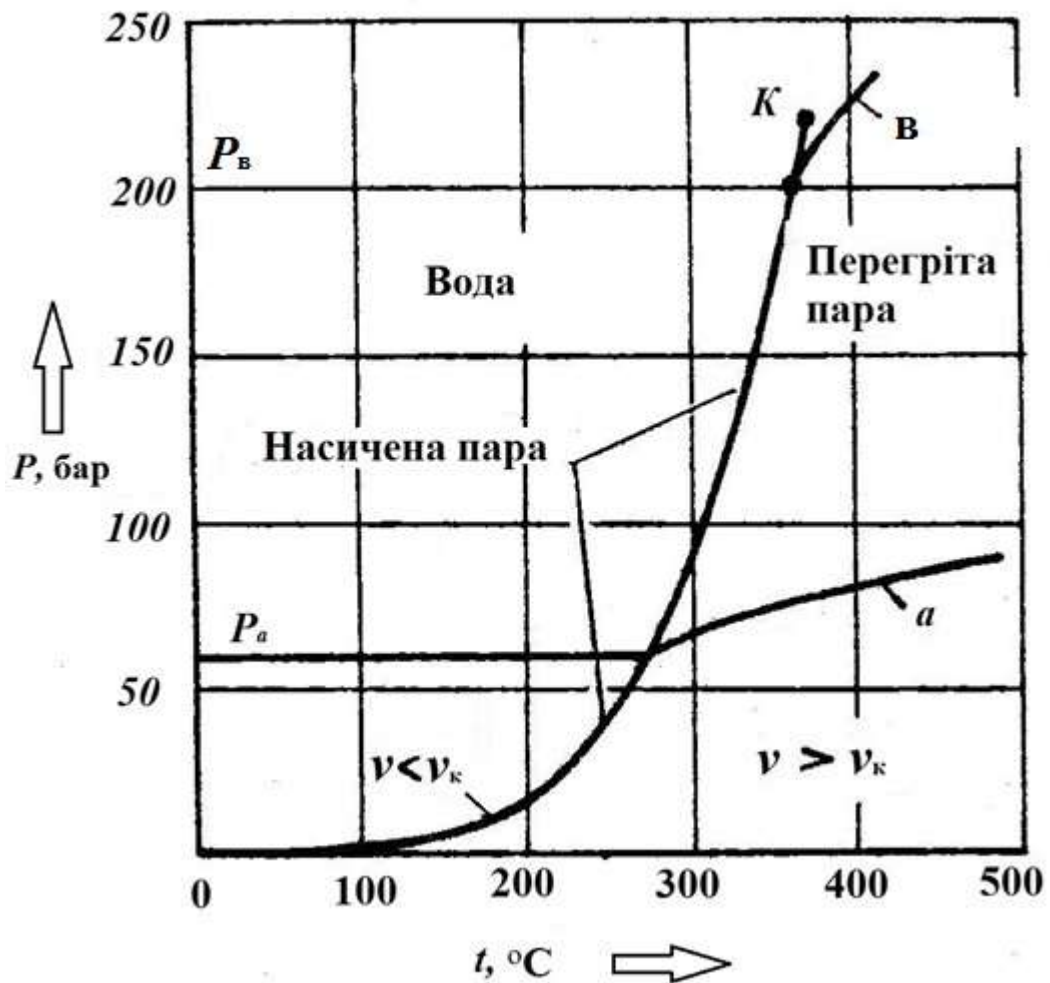


Рисунок 1 –  $P$ - $t$  діаграма води, насиченої та перегрітої пари.

Залежно від кількості води  $m$ , що знаходиться в посудині об'ємом  $V$ , при завершенні пароутворення можливий перехід в область перегрітої пари або в область води. Так, при  $V = \frac{V}{m} > V_k$  при ізохорному підведенні тепла почнеться перегрів пари. Надалі зі зростанням температури тиск перегрітої пари зростає повільно, що добре видно на  $P$ - $t$  діаграмі.

Для визначення питомої кількості тепла  $q_{1-2}$  для ізохорного перегріву пари в процесі 1-2 можна скористатися виразом для першого закону термодинаміки, кДж/кг:

$$q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + l_{1-2} \quad (2)$$

де  $\Delta U_{1-2}$  – зміна внутрішньої енергії, кДж/кг;

$l_{1-2}$  – робота, кДж/кг.

Так як в ізохорному процесі  $l_{1-2} = 0$ , а

$$\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1 = (i_2 - P_2 V_2) - (i_1 - P_1 V_1),$$

отримаємо

$$q_{1-2} = i_2 - i_1 - \nu(P_2 - P_1). \quad (3)$$

При ізохорному нагріванні в посудині з великою кількістю води, тобто при  $\nu < \nu_k$  процес перейде в область води. Подальше нагрівання викликає інтенсивне зростання тиску при незначному підвищенні температури. Це явище може відбутися, наприклад, при неправильній експлуатації гідромуфти. Відомі випадки, коли через надмірне підвищення тиску відбувалося механічне руйнування корпусу гідромуфти, що призводило до різкого скидання тиску, миттєвого закипання води, що знаходилася в ньому, і «парового вибуху».

## I. МЕТА РОБОТИ

Метою цієї роботи є поглиблення знань з розділу «Водяна пара», експериментальне вивчення термодинамічних властивостей водяної пари, отримання практичних навичок використання таблиць та діаграм стану водяної пари.

Під час проведення лабораторної роботи необхідно виконати наступне:

1. Виміряти експериментальні значення тиску  $P$  і температури  $t$  при ізохорному нагріванні води та водяної пари.

2. Побудувати експериментальну залежність  $P=f(t)$ .

3. Знайти експериментальні точки  $P$ - $\nu$ ,  $t$ - $S$ ,  $i$ - $S$  діаграм водяної пари, визначити питомий об'єм  $V$  і масу води  $m$ , що бере участь у процесі.

4. Використовуючи експериментальну залежність  $P(t_n)$  для декількох її точок, визначити значення теплоти пароутворення і побудувати залежність  $r = f(t)$ .

5. Для двох довільних точок, що знаходяться в області перегрітої пари, визначити кількість тепла  $Q_{1-2}$ , що підводиться до робочого тіла.



## 2. ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

Установка для експериментального вивчення ізохорного процесу змін стану насиченої і перегрітої водяної пари (рис. 2) включає в себе товстостінну посудину 1 з нержавіючої сталі, яка обігривається бічним 2 і нижнім 15 електронагрівачами, що включаються вимикачами 2, 13, 14. Посудина закрита теплоізоляцією 5 і вміщена у кожух 6.

Вимірювання температури пари всередині посудини здійснюється за допомогою хромель-копеляної термопари, робочий спай 3 якої вміщений у гільзу 4, вварену в кришку посудини. Холодний спай термопари 18 знаходиться в термосі з льодом, що тане 19. Термо-електрорушійна сила термопари  $E(t, 0^\circ)$  вимірюється електронним цифровим мілівольтметром 17. Надлишковий тиск пари  $P_{\text{надл}}$  всередині посудини вимірюється зразковим пружинним манометром 9.

Атмосферний тиск  $B$  визначається за допомогою барометра 8. Електроконтактний манометр 10, реле 12 і магнітний пускач 16 служать для відключення установки при досягненні заданого граничного тиску пари всередині посудини. Посудина з'єднана з манометрами за допомогою трубки 7.

У посудині немає повітря. Під час підготовки установки до роботи посудина повністю заповнюється дистильованою водою, потім вмикається нагрівач і при невеликому надлишковому тиску надлишок води випускається через штуцери манометрів. При цьому приєднувальні трубки також заповнюються конденсатом, що унеможливорює наявність баластного об'єму.

## 3. ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДУ

Лабораторна робота проводиться одночасно на двох установках «А» та «В». Умови дослідів відрізняються лише кількістю води, що знаходиться у посудинах.

В посудині установки «А» кількість води  $m_a$  підібрано так, щоб при ізохорному нагріванні перехід в область перегрітої пари відбувався при тиску  $P = 180 - 200$  бар. При цьому більшість експериментальних точок відповідає параметрам сухої насиченої пари. За даними, отриманими на цій установці, досліджується крива насичення  $P(t_n)$  та визначається зміна питомої теплоти пароутворення  $r(t_n)$ .

У посудині установки «В» знаходиться менше води  $m_b$  і перехід в область перегрітої пари відбувається при тиску  $P = 50 - 70$  бар. Значна частина експериментальних точок, отриманих на цій установці, знаходиться в області перегрітої пари і може бути побудована в робочій зоні стандартних  $t - S$  та  $i - S$  діаграм стану водяної пари.

При обробці результатів дослідів необхідно використовувати дані, отримані на обох установках.

Установки слід увімкнути за 30 хвилин до початку вимірювань для нагрівання. При цьому працюють бічні та нижні електронагрівачі. Під час вимірів бічні нагрівачі відключаються і обігрів проводиться тільки нижніми нагрівачами. Це знижує похибку дослідних даних через можливе перегрівання пари, що знаходиться в посудині над поверхнею рідини, відносно температури насичення.

Вимірювання параметрів на установці «А» необхідно починати з тиску 50 бар і закінчувати при досягненні 230 бар. На установці «В» починати виміри з  $P = 20$  бар, а закінчувати при температурі перегрітої пари  $t = 450$  °С, що відповідає термоЕРС  $E(t, 0^\circ) = 35,87$  мВ.

Показання манометра та мілівольтметра у дослідях вимірювати одночасно. Необхідно також заміряти атмосферний тиск  $B$  і записати величини об'ємів посудин  $V_a$  і  $V_b$ .

Дослідні дані занести до табл. 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

Номер дослідів	Покази манометра $n$ , діл	Абсолютний тиск у посудині $P$ , бар	ТермоЕРС $E(t, 0)$ , мВ	Температура пари $t$ , °С
УСТАНОВКА «А»				
1				
2				
3				
УСТАНОВКА «В»				
1				
2				
3				

Атмосферний тиск  $B$ , мм рт.ст.

## 4. ОБРОБКА ДОСЛІДНИХ ДАНИХ

У процесі обробки даних необхідно визначити:

4.1. Абсолютний тиск пари, Па:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{надл}} + B, \quad (4)$$

де  $P_{\text{надл}}$  – надлишковий тиск, Па;

$$P_{\text{надл}} = n_{\text{дел}} \frac{P_{\text{max}}}{100}, \quad (5)$$

де  $P_{\text{max}}$  – межа виміру даного манометра, Па.

4.2. Температуру пари за значенням, що було виміряне термоЕРС  $E(t, \theta^\circ)$ , використовуючи градууювальну таблицю Х-К, наведену у табл. Д. 2.

Потім побудувати в  $P$ - $t$  координатах значення тиску та температури, виміряні на обох установках, як показано на рис. 1. Для порівняння тут же нанести графік залежності  $P(t_{\text{н}})$ , побудований за даними з табл. Д.1. Експериментальні та табличні дані мають практично збігатися.

4.3. При яких значеннях тисків  $P_a$  і  $P_b$  відбувається перехід зі стану насиченої пари в область перегрітої пари в посудинах установок «А» і «В».

При цьому графіки експериментальної залежності  $P(t)$  відхиляються праворуч від кривої насичення  $P(t_{\text{н}})$ , як видно з рис. 1.

4.4. Питомий об'єм пари в установках, тобто  $V_a$  та  $V_b$ . Для цього за даними табл. 1 побудувати пограничні криві в  $P$ - $v$  координатах, як показано на рис. 3, потім знайти точки перетину ліній  $P = P_a$  та  $P = P_b$  з пограничною кривою  $X = 1$ . Абсциси цих точок перетину відповідають значенням питомого об'єму пари  $v_a$  та  $v_b$ .

4.5. Маса робочого тіла в посудинах установок «А» та «В», кг:

$$m = \frac{V}{v}, \quad (6)$$

де  $V$  – об'єм посудини, який вказано на лабораторній установці,  $\text{м}^3$ .

4.6. Залежність питомої теплоти пароутворення від температури насичення  $t_{\text{н}}$ , за допомогою рівняння Клапейрона-Клазіуса (1). Вхідні до рівняння (1) значення похідної  $\frac{dP}{dt_{\text{н}}}$  визначити графічним диференціюванням експериментальної залежності  $P(t)$ , як показано на рис. 4 для довільної точки:

$$\frac{dP_i}{dt_{\text{н}i}} \approx \frac{\Delta P_i}{\Delta t_{\text{н}i}}$$

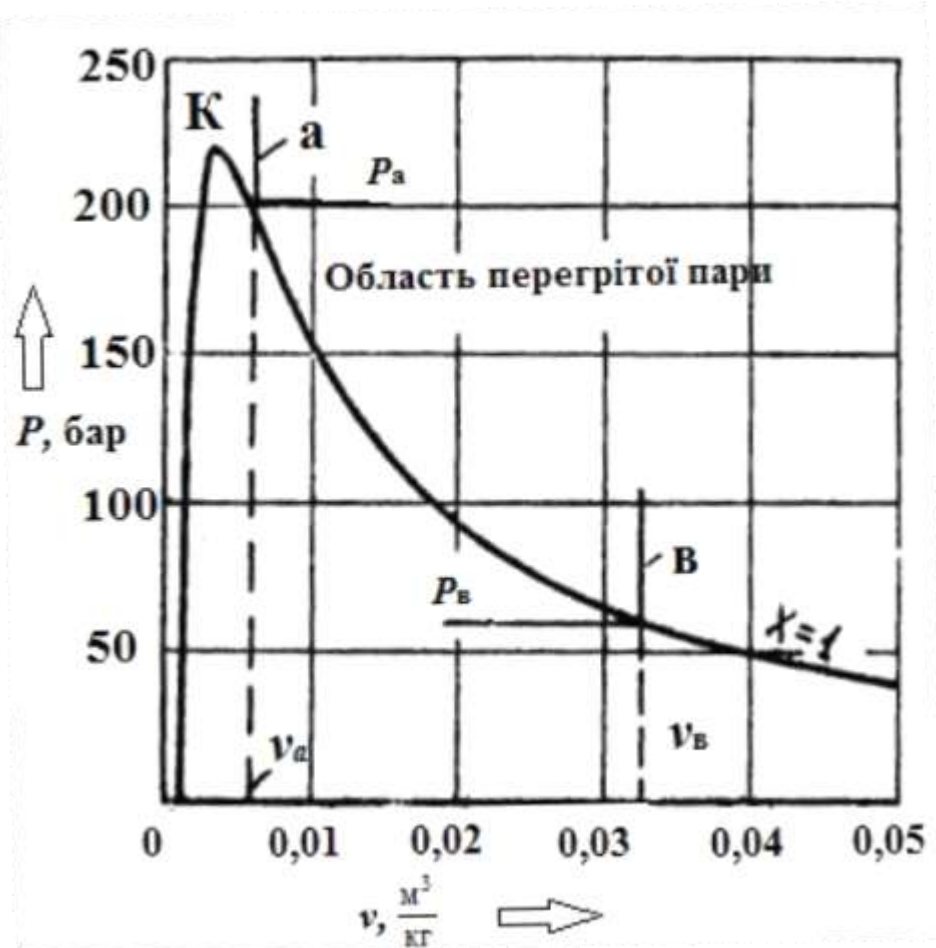


Рисунок 3 – Зображення процесів у  $P$ - $v$  координатах

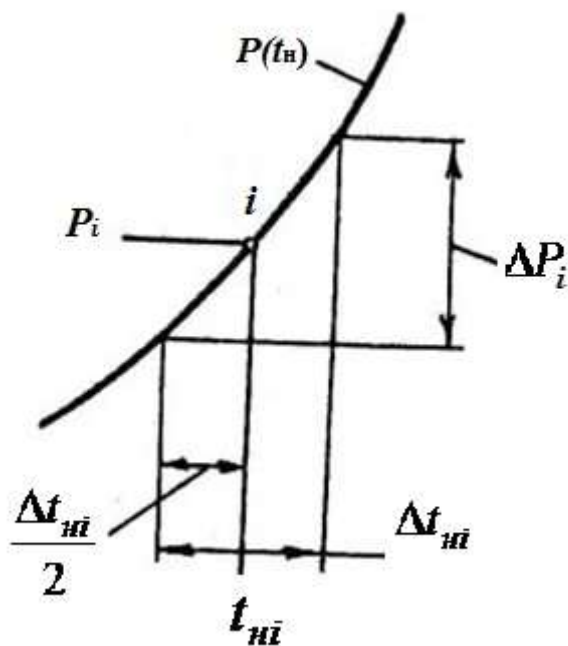


Рисунок 4 – Схема графічного диференціювання функції  $P(t_n)$  у довільній точці

Значенням питомого об'єму води  $v'$  та сухої насиченої пари  $v''$  необхідно взяти з табл. П.І. При підстановці значень тиску  $P$  в бар, для отримання  $r$  в кДж/кг, доцільно формулу (1) записати у вигляді:

$$r = T(v'' - v') \frac{dP}{dt_H} \cdot 10^2. \quad (8)$$

Вихідні дані для розрахунку питомої теплоти пароутворення і отримані результати занести до табл. 2.

Розрахунок виконувати для 5-7 точок.

Таблиця 2 – Дані для розрахунку

Номер досліджу	$P$ , бар	$t$ , °C	$T$ , К	$\frac{\Delta P_i}{\Delta t}$ , бар/град	$v'$ , $\frac{M^3}{KG}$	$v''$ , $\frac{M^3}{KG}$	$r$ , $\frac{кДж}{кг}$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

За отриманими значеннями залежності  $r = f(t_H)$  побудувати графік, як показано на рис. 5.

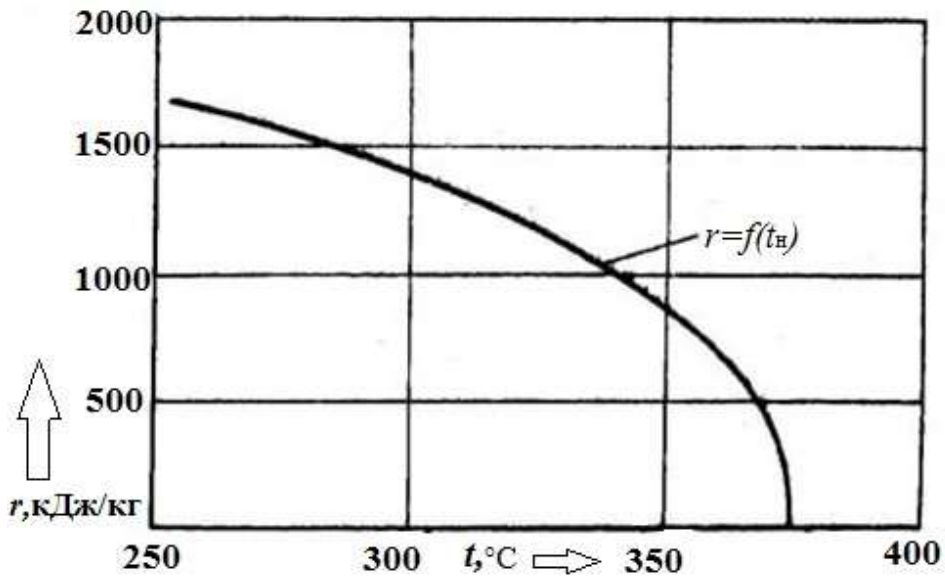


Рисунок 5 – Графік залежності питомої теплоти пароутворення  $r$  від температури кипіння  $t_n$ .

Потім нанести точки експериментальної залежності  $P(t)$  на стандартних  $t-S$  та  $i-S$  діаграмах. Такі діаграми можна отримати у навчально-методичному кабінеті кафедри.

Визначити, якою ізохорою  $v_B$  можна інтерполювати експериментальні точки в області перегрітої пари. Порівняти значення питомого об'єму пари з отриманим раніше за допомогою  $P-v$  діаграми.

У діаграмі  $i-S$  на графіку експериментальної ізохори  $v_B$  в області перегрітої пари позначити дві довільні точки 1 і 2, як показано на рис. 6.

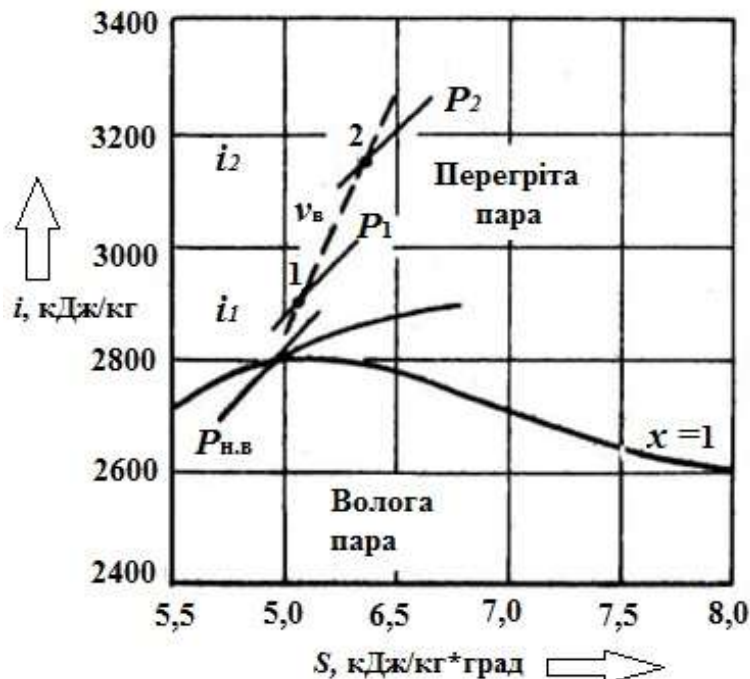


Рисунок 6 – Зображення процесу ізохорного перегріву пари в  $i-S$  діаграмі

Визначити кількість тепла  $Q_{1-2}$ , підведеного до пари в ізохорному процесі 1-2, скориставшись формулою (3). Значення ентальпії  $i_1$  та  $i_2$  для обраних точок необхідно визначити за  $i$ - $S$  діаграмою. Якщо використовувати значення ентальпії  $i$  (кДж/кг), а тиск  $P$  (бар), то рівняння (3) доцільно подати у вигляді, Дж:

$$Q_{1-2} = m \cdot q_{1-2} = m((i_2 - i_1) \cdot 10^3 - \nu(P_2 - P_1) \cdot 10^5). \quad (9)$$

У звітах студенти мають зобразити графіки дослідних даних у  $t$ - $S$  та  $i$ - $S$  координатах у меншому масштабі, як, наприклад, показано на рис. 6, 7. Для побудови на діаграмах пограничних кривих  $X = 0$  та  $X = I$  можна скористатися таблицями або діаграмами термодинамічних властивостей води та пари.

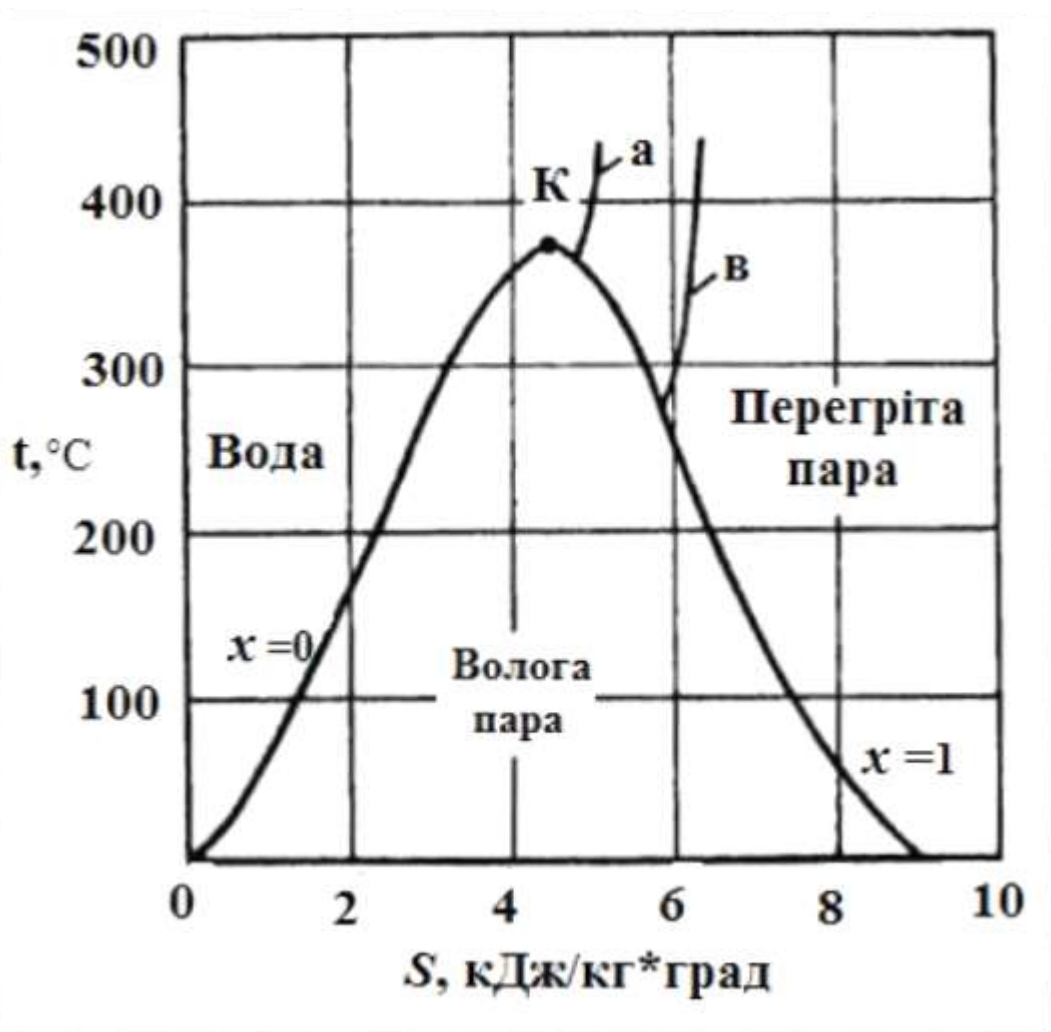


Рисунок 7 – Зображення процесів у  $t$ - $S$  діаграмі

## 5. ЗВІТ ПРО РОБОТУ

Звіт про виконану лабораторну роботу має містити:

- схему лабораторної установки;

- таблиці з результатами вимірів та розрахунків;
- обробку дослідних даних за вказаною методикою;
- зображення графіків експериментальних даних  $P-t$ ,  $P-v$ ,  $t-S$  та  $i-S$  координатах, графік залежності  $r(t_H)$ ;
- короткі відповіді на контрольні питання.

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Дайте визначення насиченої та перегрітої пари. Які параметри характеризують стан пари?

2. Чому для водяної пари не можна використовувати розрахункові формули ідеального газу?

3. Поясніть, як користуватися таблицями термодинамічних властивостей води та водяної пари?

4. Поясніть структуру  $P-v$ ,  $t-S$ ,  $i-S$  діаграм водяної пари. Що виражають пограничні криві, критична точка, як зображуються ізобари, ізохори, ізотерми, адіабати? Як визначити параметри пари за допомогою діаграм?

5. Якщо тиск у контурі парогенератора 90 бар, то яка температура кипіння води в екранних трубах при цьому?

6. Поясніть фізичний сенс питомої теплоти пароутворення  $r$ . Як у  $T-S$  та  $i-S$  діаграмах можна графічно зобразити величину  $r$  та проаналізувати її зміну з підвищенням тиску та температури кипіння?

7. За допомогою табл. Д. 1 визначте, у скільки разів відрізняються значення питомого об'єму та густина води і насиченої пари при тиску 50 та 200 бар?

8. Поясніть принцип природної циркуляції води та пароводяної суміші у кип'ятильному контурі парогенератора. Чому застосування парогенераторів з природною циркуляцією обмежується тиском 100 бар?

9. Поясніть схему лабораторної установки, які вимірювальні прилади використовуються для визначення параметрів пари? Поясніть принцип їхньої дії.

10. Як змінюватимуться параметри стану робочого тіла при ізохорному підведенні тепла, якщо в посудині знаходиться кількість води, що відповідає критичному питомому об'єму  $v_{кр}$ , якщо питомий об'єм робочого тіла більший чи менший за критичний?

11. Дайте визначення першого закону термодинаміки. Як визначити роботу, кількість тепла, зміну внутрішньої енергії для ізохорного та інших термодинамічних процесів водяної пари?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка: підручник. – Київ: Техніка, 2006. – 320 с.
2. Василенко І. А. Збірник задач та вправ для вивчення термодинамічних процесів: навч. посіб. / І. А. Василенко, С. О. Куманьов, О. А. Півоваров. – Д.: Акцент ПП, 2014. – 249 с.
3. Павловський В.Г. Термодинаміка фізико-енергетичних процесів: навч. посібник для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. У 2-х ч.: Ч. 2 / В.Г. Павловський, Г.І. Павловський. – Харків : НТУ «ХП», 2003. – 336 с.
4. Пеньков В. І. Технічна термодинаміка: навч. посібник / В. І. Пеньков. – Рівне : НУВГП, 2010. – 209 с.
5. Константинов С. М., Панов Є. М. Теоретичні основи теплотехніки: Підручник. – Київ.: Золоті ворота, 2012. – 592 с.

## ДОДАТОК

Таблиця Д.1 – Властивості води та водяної пари на лінії насичення

$P$ , бар	$t$ , °C	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$i'$ , кДж/кг	$i''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$S'$ , кДж/ (кг·C)	$S''$ , кДж/ (кг·C)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,010	6,92	0,0010001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484	0,1054	8,975
0,015	13,038	0,0010007	87,90	0,001138	54,75	2525	2470	0,1958	8,827
0,020	17,514	0,0010014	66,97	0,01493	73,52	2533	2459	0,2609	8,722
0,025	21,094	0,0010021	54,24	0,01843	88,50	2539	2451	0,3124	8,642
0,030	24,097	0,0010028	45,66	0,02190	101,04	2545	2444	0,3546	8,576
0,035	26,692	0,0010035	39,48	0,02533	111,86	2550	2438	0,3908	8,521
0,040	28,979	0,0010041	34,81	0,02873	121,42	2554	2433	0,4225	8,473
0,045	31,033	0,0010047	31,13	0,03211	130,00	2557	2427	0,4507	8,431
0,050	32,88	0,0010053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393
0,060	36,18	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567	2415	0,5207	8,328
0,070	39,03	0,0010075	20,53	0,04871	163,43	2572	2409	0,5591	8,274
0,080	41,54	0,0010085	18,10	0,05525	173,9	2576	2402	0,5927	8,227
0,090	43,79	0,0010094	16,20	0,06172	183,3	2580	2397	0,6225	8,186
0,10	45,84	0,0010103	14,68	0,06812	191,9	2584	2392	0,6492	8,149
0,11	47,72	0,0010111	13,40	0,07462	199,7	2588	2388	0,6740	8,116
0,12	49,45	0,0010119	12,35	0,08097	207,0	2591	2384	0,6966	8,085
0,13	51,07	0,0010126	11,46	0,08726	213,8	2594	2380	0,7174	8,057
0,14	52,58	0,0010133	10,69	0,09354	220,1	2596	2376	0,7368	8,031
0,15	54,00	0,0010140	10,02	0,09980	226,1	2599	2373	0,7550	8,007
0,20	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
0,25	64,99	0,0010199	6,202	0,1612	272,0	2618	2346	0,8934	7,830
0,30	69,12	0,0010222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769
0,40	75,88	0,0010264	3,994	0,2504	317,7	2636	2318	1,0261	7,670
0,50	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2204	1,0910	7,593
0,60	85,95	0,0010330	2,732	0,3661	360,0	2653	2293	1,1453	7,531
0,70	89,97	0,0010359	2,364	0,4230	376,8	2660	2283	1,1918	7,479
0,80	93,52	0,0010385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273	1,2330	7,434
0,90	96,72	0,0010409	1,869	0,5350	405,3	2670	2265	1,2696	7,394
1,00	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,360
1,1	102,32	0,0010452	1,550	0,6453	428,9	2679	2250	1,3327	7,328
1,2	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244	1,3606	7,298
1,3	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238	1,3866	7,271
1,4	109,33	0,0010510	1,236	0,8088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246
1,5	111,38	0,0010527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226	1,4336	7,223
1,6	113,32	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221	1,4550	7,202
1,7	115,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216	1,4752	7,182
1,8	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211	1,4943	7,163
1,9	118,62	0,0010591	0,9290	1,076	497,9	2704	2206	1,5126	7,145
2,0	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127
2,1	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198	1,5470	7,111
2,2	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193	1,5630	7,096
2,3	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524,0	2713	2189	1,5783	7,081
2,4	126,09	0,0010659	0,7465	1,340	529,8	2715	2185	1,5929	7,067
2,5	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182	1,6071	7,053

Продовження табл. Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2,6	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178	1,621	7,040
2,7	129,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2175	1,634	7,074
2,8	131,20	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171	1,647	7,015
2,9	132,39	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2724	2167	1,660	7,003
3,0	133,54	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992
3,1	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	566,3	2727	2161	1,683	6,981
3,2	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157	1,695	6,971
3,3	136,82	0,0010765	0,5539	1,805	575,7	2730	2154	1,706	6,961
3,4	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151	1,717	6,951
3,5	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148	1,728	6,941
3,6	139,87	0,0010797	0,5104	1,959	588,7	2734	2145	1,738	6,932
3,7	140,84	0,0010807	0,4975	2,010	592,8	2735	2142	1,748	6,923
3,8	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139	1,758	6,914
3,9	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136	1,768	6,905
4,0	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897
4,1	144,51	0,0010845	0,4518	2,213	608,5	2740	2131	1,786	6,889
4,2	145,39	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129	1,795	6,881
4,3	146,25	0,0010865	0,4319	2,315	616,1	2742	2126	1,804	6,873
4,4	147,09	0,0010874	0,4227	2,366	619,8	2743	2123	1,812	6,865
4,5	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121	1,821	6,857
5,0	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,860	6,822
6,0	158,84	0,0011007	0,3156	3,169	670,5	2757	2086	1,931	6,761
7,0	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067	1,992	6,709
8,0	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
9,0	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623
10,0	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587
11,0	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000	2,179	6,554
12,0	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987	2,216	6,523
13,0	191,60	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1673	2,251	6,495
14,0	195,04	0,0011490	0,1408	7,103	830,0	2790	1960	2,284	6,469
15,0	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
16,0	201,36	0,0011586	0,1238	8,080	858,3	2793	1935	2,344	6,422
17,0	204,30	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,400
18,0	207,10	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379
19,0	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901	2,422	6,359
20,0	212,37	0,0011766	0,0958	10,041	908,5	2799	1891	2,447	6,340
21,0	214,84	0,0011809	0,09492	10,54	919,8	2800	1880	2,470	6,322
22,0	217,24	0,0011851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870	2,492	6,305
23,0	219,55	0,0011892	0,08679	11,52	941,5	2801	1860	2,514	6,288
24,0	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2802	1850	2,534	6,272
25,0	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840	2,554	6,256
26,0	226,03	0,0012012	0,07688	13,01	971,7	2803	1831	2,573	6,242
27,0	228,06	0,0012050	0,07406	13,50	981,3	2803	1822	2,592	6,227
28,0	230,04	0,0012088	0,07141	14,00	990,4	2803	1813	2,611	6,213
29,0	231,96	0,0012126	0,06895	14,50	999,4	2803	1804	2,628	6,199
30,0	233,83	0,0012163	0,0665	15,00	1008,3	2804	1796	2,646	6,186
32	237,44	0,0012238	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778	2,679	6,161
34	240,88	0,0012310	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761	2,710	6,137
36	244,16	0,0012380	0,05543	18,04	1057,5	2802	1745	2,740	6,113

Закінчення табл. Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
38	247,31	0,0012450	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729	2,769	6,091
40	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,070
42	253,24	0,0012588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698	2,823	6,049
44	256,05	0,0012656	0,04508	22,18	1115,3	2798	1683	2,849	6,029
46	258,75	0,0012724	0,04305	23,23	1128,8	2797	1668	2,874	6,010
48	561,37	0,0012790	0,04118	24,29	1141,8	2796	1654	2,898	5,991
50	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640	2,921	5,973
55	269,94	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6	2,976	5,930
60	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,890
65	280,83	0,0013347	0,02973	33,64	1241,3	2779	1537,5	3,076	5,851
70	285,80	0,0013510	0,02737	36,54	1267,4	2772	1504,9	3,122	5,814
75	290,50	0,0013673	0,02532	39,49	1292,7	2766	1472,8	3,166	5,779
80	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,0	2758	1441,1	3,208	5,745
85	299,24	0,0014005	0,02192	45,62	1340,8	2751	1409,8	3,248	5,711
90	303,32	0,0014174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3	3,278	5,678
95	307,22	0,0014345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4	3,324	5,646
100	310,96	0,0014521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317,0	3,360	5,615
110	318,04	0,001489	0,01598	62,58	1450,2	2705	1255,4	3,430	5,553
120	324,63	0,001527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5	3,496	5,492
130	330,81	0,001567	0,01277	78,30	1531,1	2662	1130,8	3,461	5,432
140	336,63	0,001611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1066,9	3,623	5,372
150	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1	3,684	5,310
160	347,32	0,001710	0,009318	107,3	1650	2582	932,0	3,746	5,247
170	352,26	0,001768	0,008382	119,3	1690	2548	858,3	3,807	5,117
180	356,96	0,001837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2	3,871	5,107
190	361,44	0,001921	0,00668	149,7	1776	2466	690	3,938	5,027
200	365,71	0,002004	0,00585	170,9	1827	2410	583	4,015	4,928
210	369,79	0,00221	0,00498	200,7	1888	2336	448	4,108	4,803
220	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

**Примітка.** Параметри критичної точки:  $t_{кр} = 374,15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $P_{кр} = 221,29 \text{ бар}$ ;  $v_{кр} = 0,0026 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Таблиця Д.2 – Градувальна таблиця хромель-копелевої терморпарі при температурі холодного спаю 0 °С

°С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,71	1,77	1,84	1,90
30	1,07	2,04	2,11	2,17	2,24	2,31	2,38	2,45	2,51	2,58
40	2,65	2,72	2,79	2,86	2,93	3,00	3,06	3,13	3,20	3,27
50	3,34	3,41	3,48	3,55	3,62	3,69	3,75	3,85	3,89	3,96
60	4,03	4,10	4,17	4,24	4,31	4,38	4,45	4,52	4,59	4,66
70	4,73	4,80	4,87	4,95	5,02	5,09	5,16	5,23	5,31	5,38
80	5,45	5,52	5,59	5,67	5,74	5,81	5,88	5,95	6,03	6,10
90	6,17	6,24	6,32	6,39	6,46	6,54	6,61	6,68	6,75	6,83
100	6,90	6,97	7,05	7,12	7,20	7,27	7,34	7,42	7,19	7,57
110	7,64	7,72	7,79	7,87	7,94	8,02	8,09	8,17	8,24	8,32
120	8,39	8,47	8,54	8,62	8,69	8,77	8,84	8,92	8,99	9,07
130	9,14	9,22	9,29	9,37	9,45	9,53	9,60	9,68	9,76	9,83
140	9,91	9,99	10,06	10,14	10,2	10,29	10,37	10,45	10,53	10,60
150	10,68	10,76	10,84	10,91	10,9	11,07	11,15	11,23	11,30	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,70	11,7	11,86	11,93	12,01	12,09	12,17
170	12,25	12,33	12,41	12,49	12,5	12,65	12,72	12,80	12,88	12,96
180	13,04	13,12	13,20	13,28	13,3	13,44	13,51	13,59	13,67	13,75
190	13,83	13,91	13,99	14,08	14,1	14,24	14,32	14,40	14,49	14,57
200	14,65	14,73	14,82	14,90	14,9	15,07	15,15	15,24	15,33	15,41
210	15,50	15,58	15,66	15,75	15,8	15,92	16,00	16,09	16,17	16,26
220	16,34	16,42	16,51	16,59	16,6	16,76	16,85	16,93	17,02	17,10
230	17,19	17,27	17,35	17,44	17,5	17,61	17,69	17,78	17,86	17,95
240	18,03	18,11	18,20	18,28	18,3	18,45	18,54	18,62	18,71	18,79
250	18,88	18,96	19,04	19,13	19,2	19,30	19,32	19,47	19,55	19,64
260	19,72	19,80	19,89	19,97	20,0	20,14	20,23	20,31	20,40	20,48
270	20,57	20,65	20,73	20,82	20,9	20,99	21,07	21,16	21,24	21,33

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторної роботи

**«ДОСЛІДЖЕННЯ ІЗОХОРНОГО ПРОЦЕСУ ЗМІНИ СТАНУ  
НАСИЧЕНОЇ І ПЕРЕГРІТОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ»**

для студентів спеціальностей 144 «Теплоенергетика»,  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
усіх форм навчання

Укладачі: ПЕРЕСЬОЛКОВ Олександр Романович  
ТАРАСЕНКО Микола Олексійович

Відповідальний за випуск

Роботу до видання рекомендувала

проф. Микола КУНДЕНКО

доц. Лариса ТЮТЮНИК

В авторській редакції

План 2024 р., поз. 828

Формат 60x84 1/16.

Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 0.7

---

Видавничий центр НТУ  
«ХП». 61002, Харків, вул.  
Кирпичова, 2

---

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія