

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
київський політехнічний інститут

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ
«ДОСЛІДЖЕННЯ КРИВОЇ ПРУЖНОСТІ
ВОДЯНОЇ ПАРИ ПРИ МАЛИХ ТИСКАХ»
З КУРСУ «ТЕПЛОТЕХНІКА»
для студентів інженерно-технічних спеціальностей

Затверджено
на засіданні кафедри
загальної теплотехніки
Протокол № 8 від 02.09.92

Київ КПІ 1993

Методичні вказівки до лабораторної роботи “Дослідження кривої пружності водяної пари при малих тисках” з курсу “Теплотехніка” для студентів інженерно-технічних спеціальностей /Укл. О.Л. Кукшин, Т.О. Ринкова. - К.: КПІ, 1993. - 20 с.

Мета даного лабораторного дослідження така: 1) експериментально встановити залежність абсолютного тиску насиченої водяної пари p_H від її температури T_H у процесі пароутворення; 2) ознайомитися з методом визначення теплоти пароутворення водяної пари r на підставі експериментально одержаної кривої пружності.

1. Робоче завдання

1.1. Прочитати теоретичні відомості, що стосуються роботи, доповнюючи їх теоретичними положеннями з конспекту лекцій та підручників.

1.2. Ознайомитися з описом експериментальної установки, з'ясувати призначення лабораторного обладнання та приладів; накреслити принципову схему установки і подати короткий опис її вузлів та приладів.

1.3. Підготувати таблицю для внесення результатів вимірів.

1.4. Дослідити на лабораторному стенді процес пароутворення для водяної пари при тисках, менших та таких, що дорівнюють атмосферному. Результати спостережень записати у таблиці вимірів.

1.5. Обробити дослідні дані та одержані числові значення абсолютного тиску p_H і температури насичення T_H . Побудувати криву пружності насиченої водяної пари $p_H = f(T_H)$.

1.6. Обчислити на підставі експериментально одержаної кривої пружності теплоту пароутворення для водяної пари r з урахуванням зв'язків між термічними та калоричними величинами при фазових перетвореннях хімічно однорідних речовин. Побудувати графічну залежність $r = f(T_H)$.

1.7. Порівняти розрахункові значення теплоти пароутворення і температури насичення з табличними (за таблицями теплофізичних

властивостей води та водяної пари). Оцінити відхилення експериментальних даних від табличних.

1.8. Скласти звіт про виконану роботу.

2. Теоретичні відомості

Водяна пара є найбільш поширеним реальним робочим тілом, яке застосовується у різних галузях науки й техніки. Для успішного вирішення інженерних завдань, пов'язаних з процесами випарювання, конденсації, та теплообміну, а також з роботою парових турбін теплових і атомних електростанцій, необхідно знати основні параметри води та водяної пари в будь-яких станах.

Водяна пара одержується в процесі пароутворення, тобто фазового переходу речовини з рідкої фази у газоподібну.

Перехід речовин із заданим тиском p_H з рідкої фази у газоподібну відбувається, як відомо, за певної температури T_H , що називається температурою насичення, та здійснюється за рахунок підведення теплоти пароутворення r . Очевидно, що кожний рівноважний стан фаз “рідина - пара” відобразиться точкою фазової pT -діаграми, а крива, що з'єднує такі точки, являє собою залежність $p_H = f(T_H)$ і називається кривою фазової рівноваги.

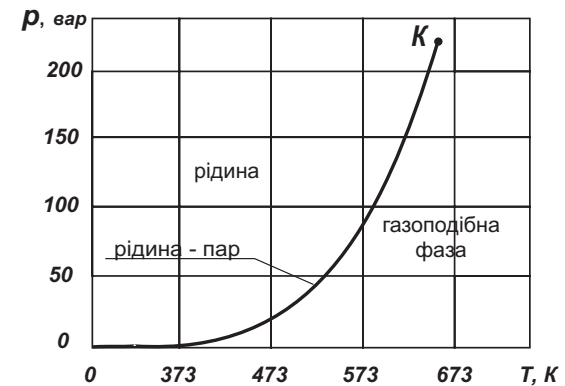


Рис. 1

Фазова діаграма водяної пари зображена на рис. 1; на ній накреслено відповідну криву фазової рівноваги - так звану криву пружності.

Точки, що лежать на кривій фазової рівноваги, відповідають двофазовій системі “рідина - пара”. Точки, що лежать на pT -діаграмі по обидва боки від кривої пружності, відповідають однорідним фазам речовини.

Крива фазової рівноваги, як видно з рис. 1, починається у “потрійній точці”, де досягається рівноважний стан трьох фаз – рідина, тверде тіло, пара, і закінчується у критичній точці K , для якої густини рідкої та газоподібної фаз однакові.

Параметри критичної точки визначаються значеннями критичного тиску: p_K – найбільшого тиску, за якого можливе існування двофазної системи “рідина - пара”, та критичної температури T_K – найвищої температури, за якої можливе існування рідкої фази. При тисках, що перевищують p_K , перехід із рідкої фази у газоподібну відсутній, оскільки за таких тисків немає принципової рівниці між рідиною та газом.

У технічній термодинаміці до всіляких змін агрегатного стану хімічних однорідних речовин (сублімація, плавлення, конденсація) можна застосувати рівняння Клайперона - Клаузіуса [1, 2], яке для процесу пароутворення має вигляд:

$$r = T_H (v'' - v') \frac{dp_H}{dT_H} \quad (1)$$

де r - теплота пароутворення, кДж/кг; T_H - температура фазового переходу (для процесу пароутворення - температура насичення), К; v'' , v' - питомі об'єми фаз, що знаходяться у рівновазі (для процесу пароутворення - питомі об'єми сухої насиченої пари та киплячої води), м³/кг; p_H - абсолютний тиск насиченої водяної пари, кПа; $\frac{dp_H}{dT_H}$ - похідна від тиску за температурою, що взята на кривій фазового переходу або кривій пружності, кПа/К.

Абсолютні тиск p_H і температура T_H обчислюються за формулами:

$$p_H = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак}} \quad (2)$$

$$T_H = t_H + 273,15 \quad (3)$$

де $p_{\text{бар}}$, $p_{\text{вак}}$ – тиск, відповідно барометричний і вакууметричний, кПа; t_H - температура насичення, °С.

Аналізуючи вирази (1 - 3), дійдемо висновку:

1) щоб знайти теплоту пароутворення, треба вміти користуватися таблицями теплофізичних властивостей води та водяної пари [3] і знати фазові діаграми p_v , T_s , h_s ;

2) у вказані залежності входять величини $p_{\text{бар}}$, $p_{\text{вак}}$, t_H , які необхідно вимірювати при проведенні експериментів.

Примітка. Одержані висновки враховувалися при компонуванні лабораторного стенду і розробці методики вимірювання та обробки дослідних даних.

3.Опис лабораторної установки

Схема установки для дослідження процесу утворення водяної пари при тисках, менших або таких, що дорівнюють атмосферному (барометричному), зображена на рис. 2. Основні елементи установки: посудина з водою (1), до дна якої закріплено електронагрівач (2); регулюючий вентиль ротаметра (11), зв'язаний з атмосферою; водоструминний інжектор (10); лабораторний трансформатор (8), що служить для зміни напруги електричного струму, який подається на спіраль електронагрівача; значення напруги на електронагрівачі фіксується вольтметром (9).

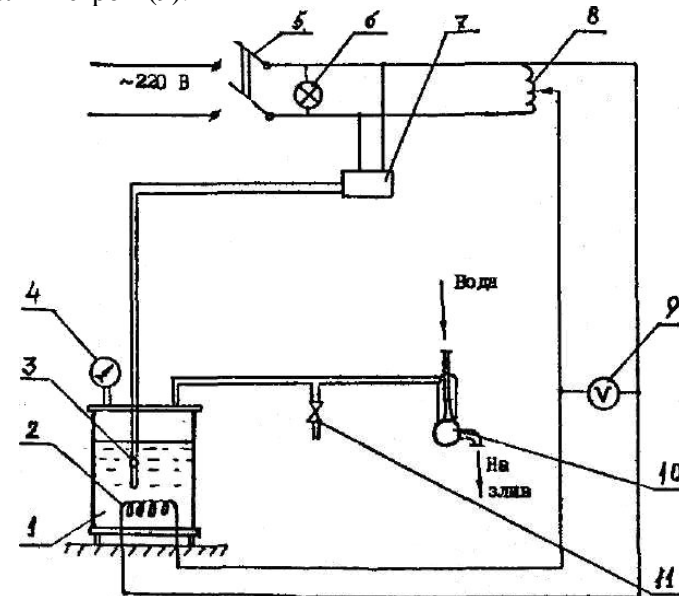


Рис. 2

Барометричний тиск $p_{\text{бар}}$ вимірюється барометром типу БР-52. Розрідження в посудині $p_{\text{вак}}$ фіксується пружинним вакуумметром (4) типу ОБВІ-100 (клас точності 2,5). Температура насиченої пари вимірюється мідним термометром опору ТСМ-50 третього класу точності (3). Дія термометра опору основана на властивості міді змінювати свій електричний опір зі зміною температури. Як вторинний пристрій, що

працює з термометром опору, використовується, показуючий мілівольтметр А-566 (7).

Працює експериментальна установка таким чином. З допомогою вимикача (5) усі елементи установки вмикаються до електричної мережі, при цьому засвічується сигнальна лампочка лабораторного стенда (6).

Вода, що знаходиться у посудині (1), нагрівається до температури кипіння за допомогою електронагрівача (2), потужність якого регулюється трансформатором (8). Пароповітряна суміш відсмоктується з посудини водострумним інжектором (10), що працює при подаванні води із водопровідної мережі. Розрідження, що створюється у посудині, вимірюється вакууметром (4). Температура насичення у градусах Цельсія висвічується на передній панелі приладу А-566. Регулюючий вентиль ротаметра (11) дозволяє частково або повністю з'єднати порожнину посудини (1) з атмосферою і тим самим змінювати у посудині тиск, якій відповідає тиску насиченої водяної пари.

4. Порядок роботи на установці

Експеримент по дослідженню кривої пружності водяної пари проводять у три етапи: 1) включення установки; 2) робота установки в стаціонарному режимі; 3) виключення лабораторного стенда. Перший і третій етапи виконує викладач або лаборант, що ведуть лабораторну роботу. Студенти проводять дослідження у стаціонарному режимі.

При певному тиску в посудині цей режим настає тоді, коли вся теплота, підведена від електронагрівача, витрачається на кипіння води та втрати теплоти в навколишнє середовище і не витрачатиметься на нагрівання води і самої посудини до температури кипіння.

Такого стану теплової рівноваги відразу після вмикання установки і фіксації певного тиску в посудині досягти, очевидно, неможливо: потрібен певний час, щоб установка вийшла на стаціонарний режим. Якщо виміри показів приладів проводити під час виходу лабораторного стенда на стаціонарний режим, одержані результати не відповідатимуть фізичним уявленням про процес.

Для більш раціонального виходу установки на стаціонарний режим необхідно враховувати такі обставини. Як відомо, пароутворення при постійному тиску в посудині відбуватиметься за постійної температури t_H .

Зміна напруги на електронагрівачі не впливає на значення температури насичення. Проте збільшення напруги, а відтак і потужності електронагрівача призводить до того, що час нагрівання води до тем-

ператури насичення зменшується і кількість пари, яка утворюється за одиницю часу на поверхні розподілу фаз, різко збільшується.

Продуктивність водострумного насоса може виявитися недостатньою для відсмоктування пари з посудини. Кипіння може йти так ефективно, що краплі води виносяться потоком пари у водострумний інжектор і він “захлинається”. Установка перестає працювати.

Якщо ж напруга на електронагрівачі буде низькою, то навіть при значному розрідженні у посудині вода не закипить протягом значного часу. Через це досліди слід проводити з урахуванням продуктивності водострумного інжектора, що створює розрідження $p_{\text{вак}}$, і залежно від інтенсивності процесу пароутворення, яка визначається показами вольтметра U . На рис. 3 зображений графік $U = f(p_{\text{вак}})$, за яким для даного розрідження в посудині, можна вибрати значення напруги на електронагрівачі. При цьому інтенсивність пароутворення не порушує роботи інжектора і забезпечує час виходу на стаціонарний режим не більше 10...15 хв.

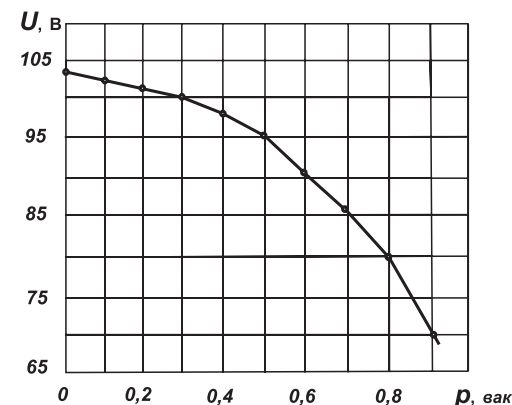


Рис. 3

Узагальнюючи викладене, дійдемо висновку, що експеримент можна проводити тільки в стаціонарному режимі роботи установки, коли при постійних показках вакуумметра та вольтметра в посудині з водою візуально спостерігається процес кипіння, а вторинний прилад А-566 (7) показує числові значення температури, що незначно відрізняються один від одного.

Перший дослід студенти виконують при показках вакуумметра 0,8 ат та вольтметра 80 В. Регулюють покази вакуумметра під час досліду поворотом вентиля ротаметра (11). Значення величин, що фіксу-

ються барометром, вакуумметром і приладом А-566, заносяться в журнал досліджень (табл. 1).

Після запису дослідних даних експеримент у тому самому режимі ($p_{\text{вак}} = 0,8$ ат, $U = 80$ В) повторюється через кожні 2 хв. доти, поки значення трьох сусідніх вимірів не будуть практично однаковими. Перехід до нового досліду здійснюється поворотом регулюючого вентиля ротаметра та встановленням стрілки вакуумметра до нового положення. При цьому напруга на електронагрівачі встановлюється згідно з графіком (рис. 3). Досліди слід проводити при показах вакуумметра, зазначених викладачем (наприклад, 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0 ат).

Журнал досліджень.

Таблиця 1

Номер досліджу	Номер вимірювання (i = 1, 2, ..., n)	Тиск		Температура насиченої пари t_H , °C
		$p_{\text{вак}}$, ат	$p_{\text{бар}}$, кПа	
1	2	3	4	5
1	1			
	2			
	3			
	ср.			
2	1			
	2			
	3			
	ср.			
3	1			
	2			
	3			
	ср.			
4	1			
	2			
	3			
	ср.			
5	1			
	2			
	3			
	ср.			

5. Обробка результатів вимірів

Визначимо абсолютний тиск та абсолютну температуру насиченої водяної пари за рівняннями (2) і (3). Для зручності подальших обчислень абсолютний тиск доцільно виразити у кілопаскалях. Тому використовують відомі співвідношення (1 бар = 750 мм рт.ст, 1 ат = 0,98 бар, 1 бар = 10^2 кПа).

За таблицями теплофізичних властивостей води та водяної пари [3] згідно з температурою насичення T_H для кожного досліду обираємо табличні значення тиску насиченої пари $p_H^{\text{табл}}$ значення питомих об'ємів сухої насиченої пари v'' та киплячої води v' , теплоту пароутворення $r^{\text{табл}}$. Знайдені величини запишемо у табл. 2.

Параметри киплячої води і насиченої пари.

Таблиця 2

Номер досліджу	T_H , К	$p_H^{\text{табл}}$, кПа	v'' , м ³ /кг	v' , м ³ /кг	$r^{\text{табл}}$, кДж/кг
1					
2					
3					
4					
5					

Маючи данні табл. 2 будемо на міліметровці теоретичну криву пружності $p_H^{\text{табл}} = f(T_H)$. Біля кривої пружності зірочками (*) наносимо експериментальні значення p_H , розраховані за формулою (2), при тих самих температурах насичення (табл. 2). Розподіл розрахункових значень p_H , відносно теоретичної кривої пружності, показує розбіжність теоретичних та експериментальних даних.

Визначимо відносне відхилення розрахункового значення абсолютного тиску від табличного за залежністю (4):

$$\delta p_H \% = \frac{|p_H - p_H^{\text{табл}}|}{p_H^{\text{табл}}} \cdot 100\% \quad (4)$$

На підставі дослідних даних обчислимо теплоту пароутворення r , кДж/кг водяної пари за формулою (1). Значення T_H , v'' , v' для кожного досліду беремо з таблиці 2.

Контрольні запитання

Значення похідної $\frac{dp_H}{dT_H}$ на кривій насичення знаходиться графічно з урахуванням масштабу її побудови. Як відомо графічна інтерпретація похідної до кривої будь-якої функції є тангенсом кута нахилу дотичної в певній точці кривої до осі аргументу. У випадку кривої пружності похідну $\frac{dp_H}{dT_H}$ розраховуємо за формулою (5):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dp_H}{dT_H} \cong \frac{\Delta p_H}{\Delta T_H} \quad (5)$$

Знайдемо відносне відхилення розрахункових значень теплоти пароутворення від табличних:

$$\delta r \% = \frac{|r - r^{\text{табл}}|}{r^{\text{табл}}} \cdot 100\% \quad (6)$$

За одержаними розрахунковими і табличними даними будується крива $r^{\text{табл}} = f(T_H)$, на яку наносяться значення r розраховані за експериментальними даними.

Результати обчислень запишемо у таблицю 3.

Таблиця 3

Номер досліджу	$t_H, ^\circ\text{C}$	T_H, K	Тиск насиченої пари			$\frac{dp_H}{dT_H}, \text{кПа/К}$	Теплота пароутворення		
			$p_H, \text{кПа}$	$p_H^{\text{табл}}, \text{кПа}$	$\delta p_H \%$		$r, \text{кДж/кг}$	$r^{\text{табл}}, \text{кДж/кг}$	$\delta r, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									
2									
3									
4									
5									

1. Що називається кипінням, пароутворенням, випаровуванням?
2. Яка пара називається вологою насиченою, сухою насиченою, перегрітою?
3. Що таке ступінь сухості і ступінь вологості пари?
4. Накресліть p_v -діаграму водяної пари, вкажіть її особливості.
5. Яким станом речовини H_2O відповідають точки, розміщені на нижній і верхній межових кривих?
6. Дайте визначення критичного стану реального робочого тіла. Які параметри його характеризують?
7. За яких умов відбувається пароутворення?
8. Що таке теплота пароутворення?
9. Дайте порядок виведення рівняння Клайперона - Клаузіуса. Як воно використовується для знаходження теплоти пароутворення?
10. Яка T_s -діаграма водяної пари? Назвіть її особливості.
11. Як з допомогою T_s -діаграми відображається ентальпія киплячої рідини h' ; теплота пароутворення r та ентальпія перегрітої пари h ?
12. Що являють собою таблиці водяної пари? Яке їх призначення та зміст?
13. Що являє собою h_s -діаграма водяної пари? Опишіть її особливості.
14. Як з допомогою таблиць та діаграм водяної пари знаходять параметри киплячої рідини?
15. Як визначають параметри сухої насиченої пари з допомогою таблиць і діаграм?
16. Як знаходять параметри вологої насиченої пари з допомогою таблиць і діаграм?
17. Визначте параметри перегрітої пари за таблицями та діаграмами.
18. Яка методика проведення експерименту по дослідженню кривої пружності водяної пари?
19. Які величини вимірювалися при виконанні лабораторної роботи? Дайте характеристику приладів, використаних з цією метою.
20. Методика обробки експериментальних даних.

Список літератури

1. Алабовоцькй А.Н., Константинов С.М., Недужий Ї.А. Теплотехніка. - К.: Вищі шк., 1936. – 225 с,
2. Константинов С.М., Луцик Р.В. Збірник задач з технічної термодинаміки та теплообміну. Навч. посіб. К.: ІВЦ “Видавництво “Політехніка”, 2009. – 546 с.: іл.
3. Вукалович МЛ. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. - М.: Энергия, 1965. – 400 с.

Навчальне видання
Методичні вказівки
до лабораторної роботи “Дослідження кривої
пружності водяної пари при малих тисках”
з курсу “Теплотехніка”
для студентів інженерно-технічних спеціальностей

Укладачі: Кукшин Олексій Павлович
Ринкова Тетяна Олексіївна

Відповідальний редактор С.М.Константинов

Рецензенти: Г.Н.Васильченко
В.М.Мінаковський

Редактор Т.О.Суворова
Коректори: Н.В.Борідько
Н.М.Савченко
Л.С.Мазен
Н.Ф.Слоніна