

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Теплоенергетичний факультет

Кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики

**ТЕПЛООБМІН ПРИ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕННЯХ.
ВИПРОМІНЮВАННЯ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт**

для студентів напряму підготовки 6.050601 «Теплоенергетика»

Рекомендовано вченою радою теплоенергетичного факультету

Київ
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
2016

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з кредитного модуля «Теплообмін при фазових перетвореннях. Випромінювання» для студентів напряму підготовки 6.050601 «Теплоенергетика» / Уклад.: Є. В. Шевель, Є. В. Новаківський, Є. С. Алексеїк, О. В. Семеняко – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. – 30 с.

*Гриф надано вченою радою теплоенергетичного
факультету
(протокол № від 2016 р.)*

Електронне навчальне видання

ТЕПЛООБМІН ПРИ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕННЯХ. ВИПРОМІНЮВАННЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт

для студентів напряму підготовки 6.050601 «Теплоенергетика»

Укладачі: *Шевель Євген Вікторович, доцент
Новаківський Євген Валерійович, доцент
Алексеїк Євген Сергійович, асистент каф. АЕС і ІТФ
Семеняко Олександр Володимирович, асистент каф.
АЕС і ІТФ*

Відповідальний
редактор: *Туз Валерій Омелянович, д.т.н., професор*

Рецензент: *Гагарін О. О., к.т.н., доцент каф. АПЕПС*

За редакцією укладачів

Лабораторна робота № 1

ВИЗНАЧЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЦИЛІНДРА

1 ПРИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ

Завданням цієї роботи є поглиблення знань теорії теплопровідності в умовах нестационарного режиму.

В результаті проведення роботи повинні бути засвоєні основні поняття процесів нестационарної теплопровідності та методика дослідження зміни температурного поля тіла в часі.

2 ЗАВДАННЯ

1. Задати початкову температурну умову суцільному циліндру.
2. Визначити зміну температури в часі на осі циліндра t_1 , та на його поверхні t_2 .
3. Побудувати графіки виміряних температур, як функцій часу $t_1=f_1(\tau)$; $t_2=f_2(\tau)$.
4. Визначити за допомогою номограм розрахункові значення температур t_1 і t_2 , як функцій крайових умов та порівняти з ними дослідні дані.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Нестационарне температурне поле суцільного нескінченного циліндра без внутрішніх джерел тепла описується диференціальним рівнянням Фур'є, вираженим в циліндричній системі координат:

$$\frac{\partial \vartheta(r, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta(r, \tau)}{\partial r} \quad (1.1)$$

де $\vartheta(r, \tau)$ – надлишкова температура точки поточного радіусу r в момент часу τ , відрахована від температури навколишнього середовища t_p :

$$\vartheta(r, t) = t(r, t) - t_p; \quad (1.2)$$

a – коефіцієнт теплопровідності матеріалу циліндра, $\text{м}^2/\text{с}$:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (1.3)$$

c – масова теплоємність матеріалу, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$;

ρ – густина матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Одне з рішень рівняння (1.1) можна отримати при крайових умовах:

- а) $\tau=0$ В початковий момент часу температура в будь-якій точці циліндра $t(r;0)$ – величина постійна

$$\vartheta(r, 0) = \vartheta_0 = t_0 - t_p \quad (1.4)$$

- б) $\tau>0$ Під час охолодження або нагрівання, при однакових граничних умовах тепловіддачі в усіх точках поверхні циліндра, на осі циліндра питомий тепловий потік дорівнює нулю. За законом Біо-Фур'є це відповідає умові:

$$q(0; \tau) = -\lambda \frac{\partial \vartheta(0, \tau)}{\partial r} = 0,$$

звідки випливає, що

$$\frac{\partial \vartheta(0, \tau)}{\partial r} = 0 \quad (1.5)$$

в) $\tau > 0$ Під час охолодження або нагрівання питомий тепловий потік q ,
 $r=R$ підведений до поверхні охолодження з боку тіла циліндра шляхом теплопровідності, повинен бути відведений в охолоджуючу рідину шляхом тепловіддачі. За законам Біо-Фур'є

$$q(R, \tau) = -\lambda \frac{\partial \vartheta(R, \tau)}{\partial r},$$

а за законом Ньютона-Ріхмана

$$q(R, \tau) = \alpha [t(R, \tau) - t_p] = \alpha \vartheta(R, \tau),$$

звідки випливає, що

$$\frac{\partial \vartheta(R, \tau)}{\partial r} = -\frac{\alpha}{\lambda} \vartheta(R, \tau) \quad (1.6)$$

Інтегруючи (1.1) в граничних умовах (1.4), (1.5) та (1.6), отримуємо рівняння нестационарного безрозмірного температурного поля для нескінченного циліндра:

$$\theta(r, \tau) = \frac{\delta(r, \tau)}{\vartheta_0} = \frac{t(r, \tau) - t_p}{t_0 - t_p} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} J_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{R}\right) e^{-\mu_n^2 F_0}, \quad (1.7)$$

де $\theta(r, \tau)$ – безрозмірна температура:

$$\theta(r, \tau) = \frac{t(r, \tau) - t_p}{t_0 - t_p}; \quad (1.8)$$

$J_0(\mu_n)$ та $J_1(\mu_n)$ – функції Бесселя першого роду нульового та першого порядку від аргументу μ_n ;

μ_n – нескінченна множина коренів трансцендентного рівняння

$$\frac{J_0(\mu_n)}{J_1(\mu_n)} = \frac{\mu}{Bi}; \quad (1.9)$$

$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$ – критерій Біо;

$Fo = \frac{a\tau}{R^2}$ – критерій Фур'є.

Оскільки рівняння (1.7) є функцією лише двох критеріїв Bi та Fo , то температуру на осі циліндра та його поверхні можна виразити через функції:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{t(0, r) - t_p}{t_0 - t_p} = \frac{t_1 - t_p}{t_0 - t_p} = f_1(Bi, Fo), \\ \theta_2 &= \frac{t(R, \tau) - t_p}{t_0 - t_p} = \frac{t_2 - t_p}{t_0 - t_p} = f_2(Bi, Fo). \end{aligned} \quad (1.10)$$

4 ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

Дослідна установка (рис. 1.1) складається з муфельної печі (1), що нагрівається електричним нагрівачем (2). Контроль температури в печі здійснюється термопарою T_3 та мілівольтметром (3). Регулювання нагріву печі здійснюється реостатом (4). Дослідний елемент (7) – суцільний циліндр

із нержавіючої сталі має насвердлені отвори по осі циліндра та у безпосередній близькості від поверхні для введення хромель-алюмелевих термопар T_1 та T_2 , що вимірюють температуру циліндра в даних точках. Термопари перемикачем (8) з'єднуються з мілівольтметром (3). Холодні спаї термопар термостатовані в термостаті (9) при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сталевий циліндр, для виключення торцевих втрат, з торців ізолюваний азбоцементними прокладками-ізоляторами (5).

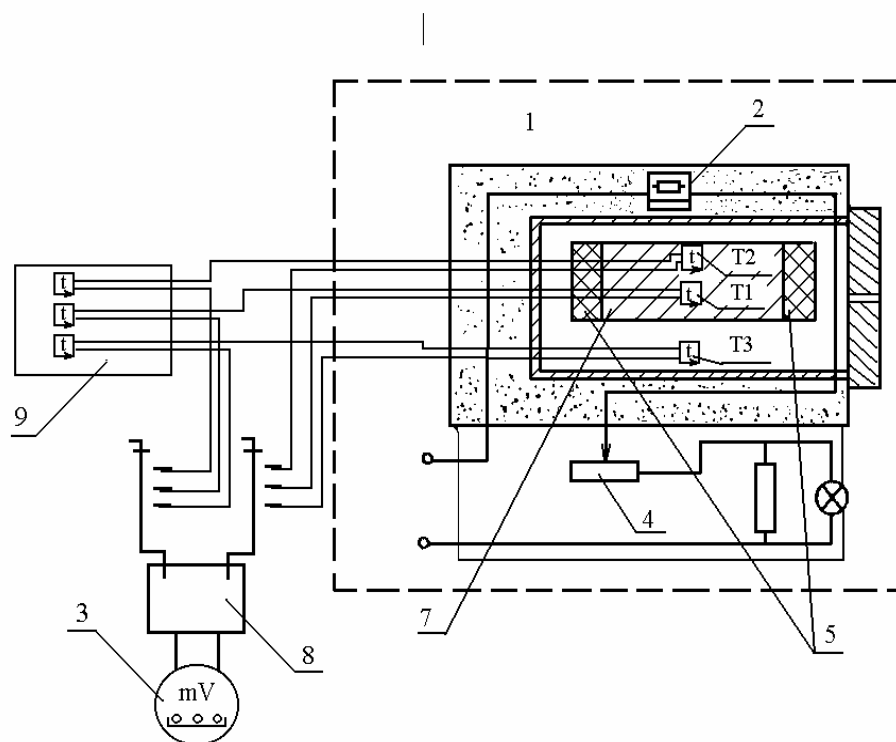


Рисунок 1.1 – Схема дослідної установки

Для забезпечення постійних умов охолодження дослідного елементу він розміщується у захищеному від зовнішніх впливів просторі.

Характеристика дослідного елементу:

Зовнішній діаметр $D = 49 \cdot 10^{-3}$ м.

Матеріал – нержавіюча сталь 1X18H9T.

Теплофізичні властивості сталі 1X18H9T: коефіцієнт теплопровідності та теплоємність в залежності від температури приведені на графіку рис. 1.2.

Густина сталі в діапазоні 20...300 °С практично не залежить від температури і дорівнює 7340 кг/м³.

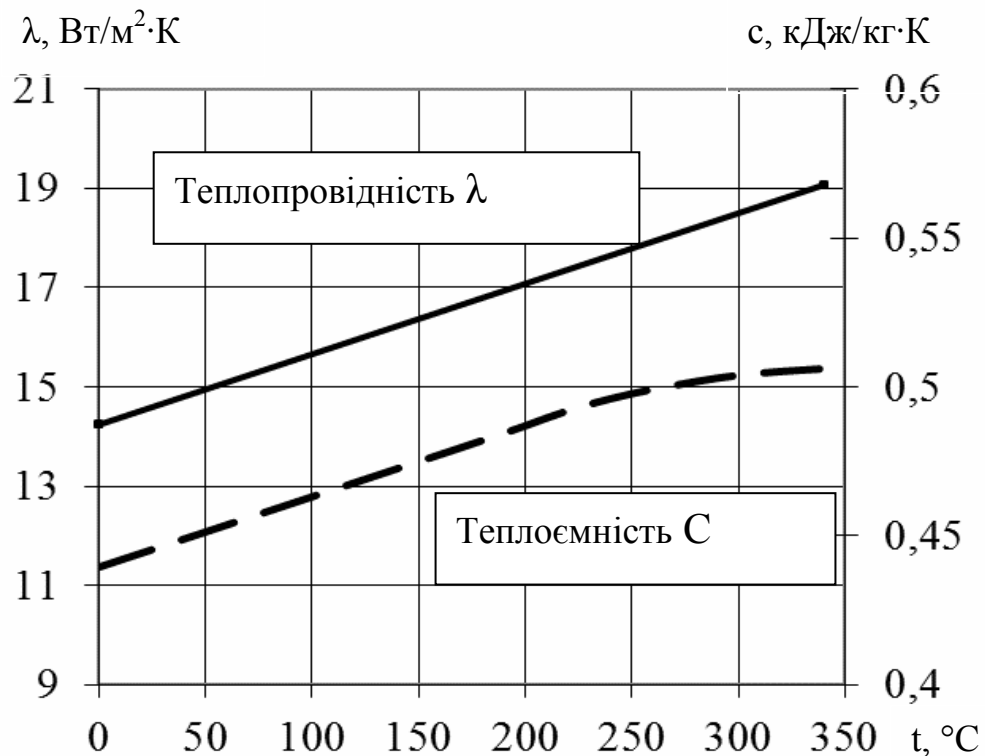


Рисунок 1.2 – Теплофізичні властивості сталі 1X18H9T

5 ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДУ

5.1 Задання початкових умов

Дослідний елемент поміщений у муфельну піч при температурі $t_{\text{п}}=300$ °С прогрівається до тих пір, поки різниця температур на осі та на поверхні циліндра $t_1(0) - t_2(R)$, що вимірюється термопарами T_1 та T_2 не буде менше 3% від температури печі (при $t_{\text{п}}=300$ °С).

Інакше кажучи, повинна виконуватись нерівність $t_1(0) - t_2(R) < 10$ °С.

5.2 Підготовка циліндра до вимірів

Після прогріву циліндра в табл. 1.1 заносяться покази термopар T_1 та T_2 . Після цього за допомогою щипців циліндр виймається з печі. В момент часу, коли циліндр з печі потрапляє на повітря, вмикається секундомір. Циліндр встановлюється на підставку так, щоб термopара T_2 знаходилась у верхньому, або в заданому положенні. У отвори циліндра вставляються термopари T_1 та T_2 , після чого циліндр на підставці огороджується захисними стінками для стабілізації умов охолодження. Перемикач (8) ставиться у положення 1, що відповідає увімкненню на прилад (9) термopари T_1 , яка вимірює температуру на осі циліндра.

5.3 Проведення вимірів

У момент проходження стрілки секундоміра через поділку 60 секунд записати в табл. 1.1 час, що пройшов з моменту, коли циліндр був витягнутий з печі на повітря, та температуру термopари T_1 у даний момент часу.

Перевівши перемикач у положення 2, через 30 секунд зробити запис показань термopари T_2 , що вимірює температуру циліндра поблизу поверхні.

Далі, перемикач переводиться в положення 1 і через 30 секунд цикл запису температури повторюється.

В роботі проводиться 30 вимірів на кожну термopару. Дослідні дані відкладаються на графік $t=f(\tau)$.

Температура визначається з урахуванням температури холодних спайів:

$$t = t_{\text{np}} + t_{\text{xc}}, \quad (1.11)$$

де t_{np} – температура, отримана в результаті переводу ЕРС термopари, що показує мілівольтметр (9), в °С за градуовальними таблицями чи графіками;

t_{xc} – температура холодних спаїв, що дорівнює температурі навколишнього середовища, °C.

6 ПОРІВНЯННЯ ДОСЛІДНИХ ДАНИХ З РОЗРАХУНКОВИМИ ЗНАЧЕННЯМИ

Для порівняння дослідних даних з теоретичними необхідно знайти критерій Bi та Fo . Визначення критерію Bi :

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}, \quad (1.12)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні циліндра до охолоджуючого середовища, Вт/м²·К;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу циліндра відповідно до рис. 1.2, Вт/(м·К).

В умовах даного досліді при вільному русі повітря, що омиває циліндр, коефіцієнт тепловіддачі можна визначити таким чином:

$$\alpha = A \sqrt[4]{9(R, \tau)} \quad (1.13)$$

Для циліндра $D=49 \cdot 10^{-3}$ м: $A=9,95$ Вт/(м²·К^{1,25}).

Визначення критерію Fo :

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2} = \frac{\lambda\tau}{c\rho R^2}, \quad (1.14)$$

де параметри λ , c , ρ наведені вище;

τ – час процесу, с.

Розрахунок теоретичних значень температури проводиться по номограмам [1] за відомими значеннями Bi та Fo . Отримані значення температур наносяться на графік дослідних даних.

7 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Фізичний зміст рівняння теплопровідності Фур'є та запис граничних умов.
2. Визначення коефіцієнтів λ , c , a , α та їхні розмірності.
3. Фізичний зміст величини μ і критеріїв Bi та Fo .
4. Що таке безрозмірна температура $\theta(R, \tau)$ та надлишкова температура $\vartheta(R, \tau)$?
5. Що таке регулярний режим та де знаходиться ділянка регулярного режиму на отриманому дослідницькому графікові?

Лабораторна робота № 2

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ КИПІННІ ВОДИ У ВЕЛИКОМУ ОБ'ЄМІ НА ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ ТРУБІ

1 ПРИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ

Завданням цієї роботи є поглиблення знань теорії теплообміну при кипінні. В результаті проведення роботи, повинні бути засвоєні основні поняття процесу та механізм кипіння, методика виміру температури поверхні нагріву і методика обробки дослідних даних.

2 ЗАВДАННЯ

1. Отримати дослідним шляхом залежність температури поверхні нагріву та коефіцієнта тепловіддачі від густини теплового потоку.

2. Побудувати графіки:

а) $t_{\text{ст}}=f_1(q)$ – для недогрітої рідини,

б) $\alpha=f_2(q)$ – для недогрітої рідини.

3. Обчислити коефіцієнт тепловіддачі $\alpha=f_2(q)$ для умов досліду по наявним критеріальним та емпіричним рівнянням. Порівняти дослідні та розрахункові дані.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Коефіцієнт тепловіддачі при кипінні є функцією густини теплового потоку на поверхні, тиску та фізичних властивостей рідини. Для води в діапазоні тиску від 0,1 МПа до 4,0 МПа ця функція може бути описана емпіричним рівнянням:

$$\alpha = 3q^{0,7} p^{-0,15}, \quad (2.1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, віднесений до різниці температур $t_{\text{ст}} - t_{\text{нас}}$, $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$;

$t_{\text{ст}}$ – температура поверхні нагріву, $^\circ\text{C}$;

$t_{\text{нас}}$ – температура насичення при даному тиску рідини, $^\circ\text{C}$;

q – густина теплового потоку, Вт/м^2 ;

p – тиск, бар.

Крім того існують критеріальні рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі α , наприклад рівняння В. І. Толубінського:

$$\frac{\alpha}{\lambda_p} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho' - \rho''}} = 75 \left(\frac{q}{r \rho'' d_0 u} \right)^{0,7} \text{Pr}^{-0,2}, \quad (2.2)$$

де λ_p – коефіцієнт теплопровідності рідини, $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м ;

r – теплота пароутворення, Дж/кг ;

ρ' , ρ'' – густина рідини та пари на лінії насичення відповідно, кг/м^3 ;

Pr – критерій Прандтля;

$d_0 u$ – швидкість зростання парових бульбашок (d_0 – відривний діаметр бульбашок, u – частота відриву бульбашок), м/с ;

q – густина теплового потоку, що відводиться від поверхні нагріву у рідину, Вт/м^2 .

Всі теплофізичні властивості у формулі (2.2) беруться при температурі насичення рідини.

4 ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

Дослідна установка (рис. 2.1) складається з циліндричного робочого елементу (1) – поверхні нагріву, виготовленої з мідної трубки. Всередині трубки встановлено ніхромовий електронагрівач (2), що здійснює нагрів поверхні. Живлення нагрівача (2) відбувається від мережі змінного струму 220 В через лабораторний автотрансформатор (ЛАТР) (5), призначений для регулювання напруги на ньому. Для вимірювання температури внутрішньої поверхні стінки дослідного елемента рівномірно по всій його довжині встановлено три мідь-константанові термопари ТП1-ТП3.

Робочий елемент встановлено між текстолітовими тримачами (10), які, в свою чергу, закріплено на алюмінієвій рамі (11). Елемент разом із тримачами занурюється в ємність з дистильованою водою (12). В цій же ємності розміщено електричний нагрівач (9), призначений для підтримання температури води на постійному рівні. Живиться електронагрівач від мережі змінного струму 220 В.

Схема вимірювань установки складається з мідь-константанових термопар ТП1-ТП3, перемикача (6), цифрового мілівольтметра (7), ртутного термометра (8), вольтметра (3) та амперметра(4). Термопари ТП1-ТП3 вимірюють температуру внутрішньої поверхні стінки робочого елемента. Покази цих термопар відображаються за допомогою мілівольтметра (7), до якого вони по чергово підключаються через перемикач (6). Ртутний термометр (8) призначено для вимірювання температури води в ємності (12). Вольтметр (3) та амперметр (4) показують напругу та силу струму в колі електронагрівача робочого елемента відповідно.

Характеристика робочого елементу:

1. Зовнішній діаметр $D=6\cdot 10^{-3}$ м.
2. Внутрішній діаметр $d=5\cdot 10^{-3}$ м.
3. Розрахункова довжина $l_p=50\cdot 10^{-3}$ м.

4. Розрахункова площа зовнішньої поверхні робочого елемента

$$F_p = \pi D l_p = 942 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

5. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки робочого елемента (мідь) можна прийняти постійним і рівним 385 Вт/(м·К).

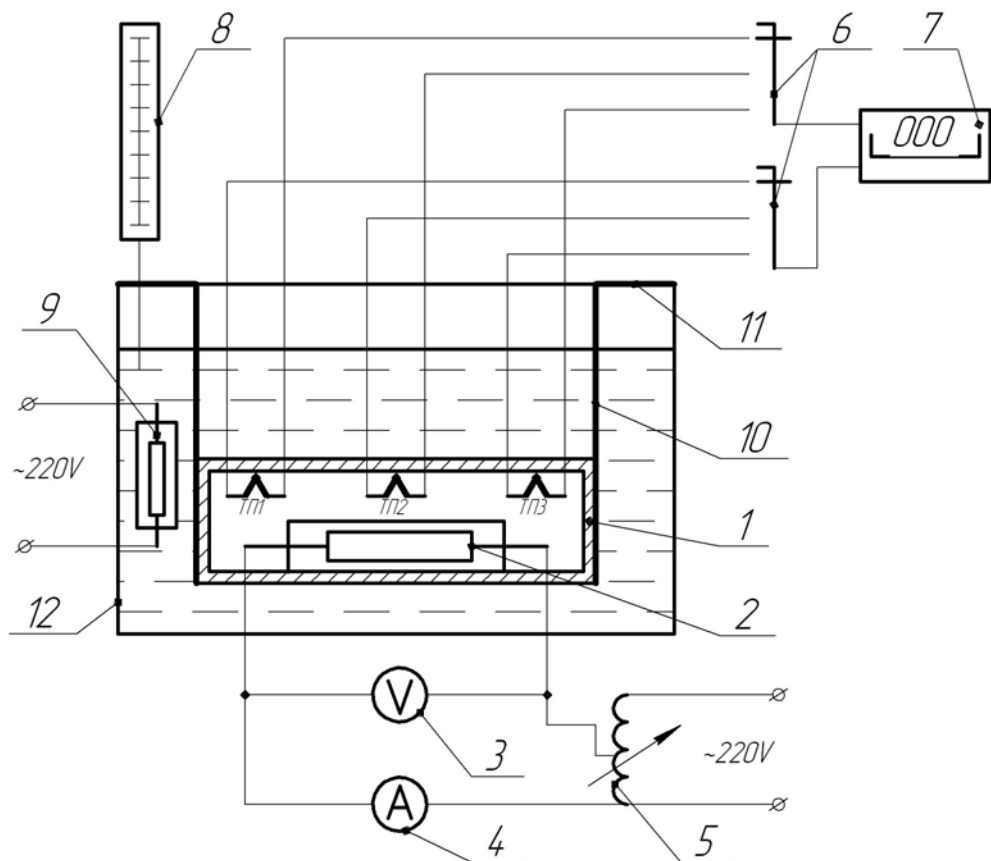


Рисунок 2.1 – Схема дослідної установки

5 ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДУ

1. За допомогою нагрівача (9) (рис. 2.1) встановити задану викладачем температуру води. Для контролю температури використовувати термометр (8).

2. Обертаючи ручку ЛАТРа (5) встановити такі параметри в колі електронагрівача (2), щоб сила струму, що фіксується амперметром (4), склала 0,4 А.
3. Дочекавшись виходу на стаціонарний режим, свідченням чого є незмінність в часі показів термопар, що відображаються мілівольтметром (7), занести в табл. 2.2 такі результати вимірювань:
 - а) силу струму на електронагрівачі робочого елемента I за показами амперметра (4);
 - б) величину напруги на електронагрівачі робочого елемента U за показами вольтметра (3);
 - в) температуру рідини t_p за показами термометра (8);
 - г) ЕРС термопар ТП1-ТП3 E_1-E_3 за показами мілівольтметра (7).Для цього необхідно по чергові підключити ці термопари до мілівольтметра за допомогою перемикача (6). Перемикач має позиції, пронумеровані «1», «2», «3». На початку дослід його встановлено в поз. «1», що відповідає підключенню термопар ТП1 до мілівольтметра. Поз. «2» відповідає підключенню ТП2, а поз. «3» - ТП3. Після запису показів всіх трьох термопар слід перевести перемикач в поз. «1».
4. Збільшувати силу струму на електронагрівачі (2) з кроком 0,2 А до досягнення значення 1,8 А. При кожному значенні сили струму фіксувати в табл. 2.2 параметри, вказані в п. 3, що відповідають стаціонарному режиму.
5. Відмітити в табл. 2.2 дослід, в якому почалось кипіння рідини на поверхні робочого елемента. Свідченням початку кипіння є поява та відрив перших парових бульбашок з поверхні робочого елемента.
6. Протягом всього дослід за допомогою нагрівача (9) та термометра (8) підтримувати температуру рідини постійною і рівною встановленій в п. 1.

7. Після досягнення стаціонарного режиму при максимальній силі струму 1,8 А та занесення всіх необхідних параметрів в табл. 2.2 встановити ручку ЛАТРа (5) в положення «0» та повідомити викладача про завершення виконання лабораторної роботи.

6 ОБРОБКА ДОСЛІДНИИХ ДАНИХ

6.1 Визначення коефіцієнта тепловіддачі за експериментальними даними

Коефіцієнт тепловіддачі можна визначити за законом Ньютона – Ріхмана:

$$\alpha = \frac{q}{t_{\text{ст.з.}} - t_p}, \quad (2.3)$$

де q – густина теплового потоку на зовнішній поверхні робочого елемента, Вт/м²;

$t_{\text{ст.з.}}$ та t_p – температури зовнішньої поверхні стінки та рідини відповідно, °С.

Густина теплового потоку на зовнішній поверхні робочого елемента можна визначити як:

$$q = \frac{IU}{F_p}, \quad (2.4)$$

де I – сила струму в колі електронагрівача робочого елемента, А;

U – напруга на електронагрівачі робочого елемента, В;

F_p – розрахункова площа зовнішньої поверхні робочого елемента, м².

Температуру зовнішньої поверхні стінки робочого елемента $t_{\text{ст.з.}}$ можна визначити з формул теплопровідності циліндричної стінки:

$$t_{\text{ст.з.}} = t_{\text{ст.вн.}} - \frac{q}{2\lambda_{\text{ст}}} D \ln \frac{D}{d}, \quad (2.5)$$

де $t_{\text{ст.вн.}}$ – температура внутрішньої поверхні стінки робочого елемента, °C;

$\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки робочого елемента (мідь) можна прийняти постійним і рівним 385 Вт/(м·K);

D та d – зовнішній та внутрішній діаметри робочого елемента відповідно, м.

Для знаходження температури внутрішньої поверхні стінки робочого елемента $t_{\text{ст.вн.}}$ необхідно визначити середнє значення показів термопар ТП1-ТП3:

$$E_{\text{ср}} = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{3}, \quad (2.6)$$

де E_1 - E_3 – ЕРС термопар ТП1-ТП3 (табл. 2.2), мВ.

Після знаходження $E_{\text{ср}}$ за формулою (2.6), отримані значення необхідно внести до табл. 2.2, а потім за градууювальною кривою для мідь-константанових термопар перевести ці значення в температури $t_{\text{ср}}$. Тоді температура внутрішньої поверхні стінки робочого елемента $t_{\text{ст.вн.}}$ знаходиться як:

$$t_{\text{вн.ст.}} = t_{\text{ср}} + t_{\text{х.сп.}}, \quad (2.7)$$

де $t_{\text{х.сп.}}$ – температура холодного спаю термопар, що дорівнює температурі повітря в приміщенні, °C.

Знайдені за (2.7) значення $t_{\text{ст.вн.}}$ записуються до табл. 2.2 та підставляються у вираз (2.5) для знаходження $t_{\text{ст.з.}}$, які також заносяться до

табл. 2.2. Використовуючи знайдені за (2.4)-(2.5) значення q та $t_{ст.з.}$, за (2.3) необхідно обрахувати значення коефіцієнту тепловіддачі α . Розраховані значення q та α також записуються до табл. 2.2.

6.2 Побудова графіків

За визначеними за виразом (2.3) значеннями коефіцієнтів тепловіддачі α та даними табл. 2.2 будуються графіки:

а) $t_{ст.з.}=f(q)$;

б) $\alpha=f(q)$;

в) $\alpha =f(t_{ст.з.} - t_p)$.

6.3 Визначення коефіцієнта тепловіддачі за емпіричними та критеріальними залежностями

Коефіцієнт тепловіддачі в області конвективного теплообміну можна визначити, використовуючи формулу Міхєєвої для вільної конвекції біля горизонтальних труб [1]:

$$\overline{Nu} = 0,5(Gr_p Pr_p)^{0,25} \cdot (Pr_p/Pr_{ст.})^{0,25}, \quad (2.8)$$

де Gr_p та Pr_p – значення чисел Грасгофа та Прандтля відповідно при температурі рідини t_p ;

$Pr_{ст.}$ – значення числа Прандтля при температурі зовнішньої поверхні стінки робочого елемента $t_{ст.з.}$.

Визначальним розміром у формулі (2.8) є зовнішній діаметр робочого елемента D .

В області кипіння коефіцієнт тепловіддачі необхідно визначити за емпіричною залежністю (2.1) та за формулою Толубінського (2.2). Всі

теплофізичні властивості води для рівняння (2.2) слід визначити при $t_{\text{нас}}=100$ °С, та занести в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Теплофізичні властивості води при $t_{\text{нас}}=100$ °С

$t_{\text{нас}},$ °С	$\lambda_p,$ Вт/м К	$\sigma,$ Н/м	$r,$ Дж/кг	$\rho',$ кг/м ³	$\rho'',$ кг/м ³	$d_{0u},$ м/с	Pr
100	0,68	0,059	$2,26 \cdot 10^6$	961,5	0,6	0,155	1,75

Будуючи графік $\alpha=f(q)$, спочатку відкладають результати, отримані за формулою (2.3), користуючись даними табл. 2.2. Після чого на цей же графік, для тих же значень q , відкладають значення α , отримані за формулами Міхєєвої (2.8) та Толубінського (2.2), а також за емпіричною залежністю (2.1).

7 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Фізичний зміст величин і комплексів що входять в розрахункові рівняння.
2. Чому при кипінні температура стінки $t_{\text{ст.з}}$ дуже мало залежить від q ?
3. Як залежить коефіцієнт тепловіддачі при кипінні від величини теплового навантаження q і температурного напору $\Delta t=t_{\text{ст}}-t_p$?
4. Як змінюється відривний діаметр, частота відриву та кількість центрів пароутворення залежно від q і $\Delta t_{\text{нед}}$?
5. Що таке теплове навантаження початку кипіння $q_{\text{п.к.}}$?
6. Як впливає недогрів рідини на $q_{\text{п.к.}}$ та коефіцієнт тепловіддачі α ?

Таблиця 2.2 – Результати вимірювань

№пп	I	U	t _p	E ₁	E ₂	E ₃	E _{ср}	t _{ст.вн.}	q	t _{ст.з}	α
	A	B	⁰ C	мВ	мВ	мВ	мВ	⁰ C	Вт/м ²	⁰ C	Вт/(м ² К)
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											

Лабораторна робота № 3

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРШОЇ КРИТИЧНОЇ ГУСТИНИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ У ВЕЛИКОМУ ОБ'ЄМІ РІДИНИ

1 ПРИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ

Завданням цієї роботи є поглиблення знань з теорії теплообміну при кипінні та засвоєння методики експериментального дослідження явища кризи теплообміну при кипінні.

В результаті роботи повинна бути визначена величина першої критичної густини теплового потоку для тонких горизонтальних дротів у великому об'ємі недогрітої рідини.

2 ЗАВДАННЯ

1. Отримати дослідним шляхом значення критичної густини теплового потоку при кипінні у великому об'ємі рідини при різних величинах недогріву.

2. Побудувати залежність критичної густини теплового потоку від величини недогріву.

3. Визначити з формули С. С. Кутателадзе значення критичної густини теплового потоку у великому об'ємі для області недогріву рідини, що досліджувалася і зіставити на графіку розрахункові та дослідні дані.

3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Існують два основних режими кипіння: бульбашковий, при якому пароутворення виникає на певних ділянках поверхні у вигляді окремих

бульбашок, та плівковий, при якому на поверхні нагріву утворюється суцільна парова плівка.

Перехід бульбашкового режиму кипіння у плівковий відбувається при певному тепловому навантаженні, яке називається критичною густиною теплового потоку $q_{кр1}$.

При бульбашковому кипінні рідина безпосередньо омиває поверхню нагріву, причому прикордонний шар її інтенсивно перемішується паровими бульбашками, що утворюються, внаслідок чого забезпечується надійне охолодження поверхні.

При густині теплового потоку $q_{кр1}$, число діючих центрів пароутворення зростає настільки, що сталість процесу теплообміну порушується, парові бульбашки зливаються і утворюють плівки пари, що ускладнює доступ рідини до поверхні нагріву. При незалежному заданні теплового потоку (граничні умови III-го роду) відбувається миттєвий перехід бульбашкового режиму кипіння у плівковий – виникає криза теплообміну. Різка погіршення тепловіддачі, в результаті утворення парової плівки, викликає стрибкоподібне підвищення температури поверхні. Якщо стрибок температури перевищує допустиму температуру щодо умов міцності матеріалу, то поверхня нагріву руйнується.

Величина критичної густини теплового потоку $q_{кр1}$, залежить від теплофізичних властивостей рідини, тиску, шорсткості та змочуваності рідиною поверхні нагріву, орієнтації її відносно вектору сили тяжіння, величини недогріву основної маси рідини до температури насичення.

Найповніше перша криза кипіння вивчена для умов кипіння у великому об'ємі догрітої до температури насичення рідини при вільному її русі. Величину $q_{кр1}$, для цих умов можна визначити за формулою Кутателадзе, отриманою в результаті узагальнення великої кількості дослідних даних:

$$(q_{кр1})_{g=0} = kr \sqrt{\rho''} \sqrt[4]{\sigma(\rho' - \rho'')g}, \quad (3.1)$$

де $(q_{\text{кр1}})_{\vartheta=0}$ – перша критична густина теплового потоку за відсутності недогріву рідини, Вт/м²;

$k=0,13-0,16$ – критерій стійкості;

r – теплота пароутворення при даному тиску, Дж/кг;

ρ', ρ'' – густина рідини та пари при температурі насичення відповідно, кг/м³;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу при температурі насичення, Н/м;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

За наявності недогріву густина теплового потоку, при якому настає криза, зростає. Це зростання спричинене потребою підігріву мас рідини, що підтікають у прикордонний шар, до температури насичення. При недогріві величину критичного теплового потоку можна визначити за формулою Кутателадзе для недогрітої рідини:

$$(q_{\text{кр1}})_g = (q_{\text{кр1}})_{\vartheta=0} \left[1 + 0,065 \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,8} \frac{c\vartheta}{r} \right], \quad (3.2)$$

де $(q_{\text{кр1}})_g$ – перша критична густина теплового потоку при наявності недогріву, Вт/м²;

c – теплоємність води при даній температурі та тиску, Дж/(кг К);

$\vartheta = t_n - t_p$ – недогрів рідини, який дорівнює різниці температури насичення та температури рідини °С.

4 ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

Дослідження проводяться на дослідній установці, наведеній на рис. 3.1.

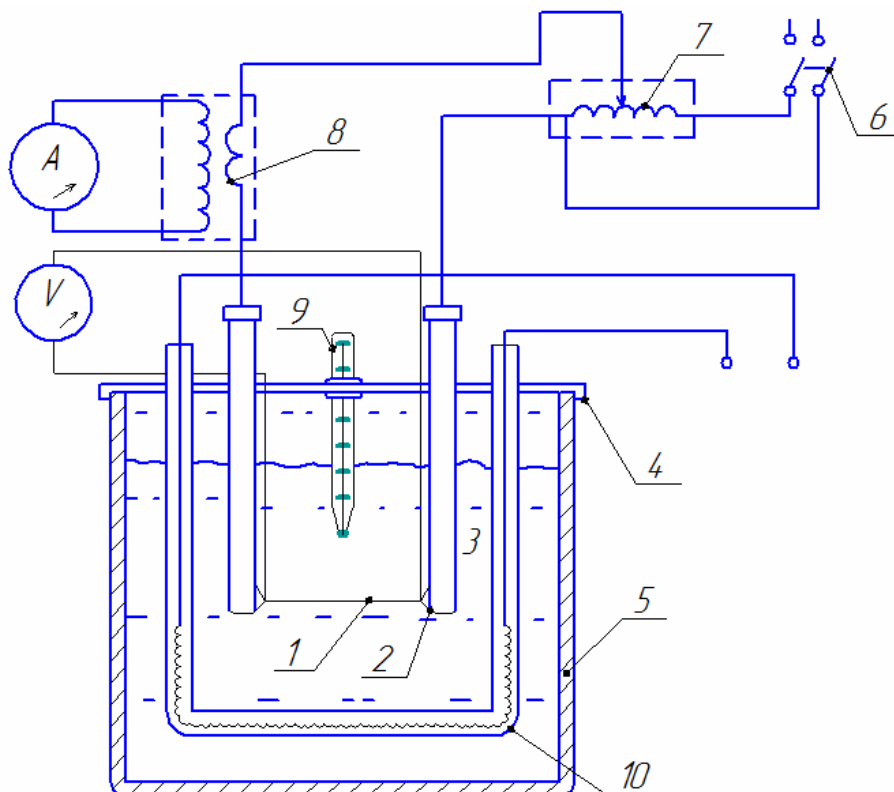


Рисунок 3.1 - Схема дослідної установки

В якості дослідного елемента використовується калібрований ніхромовий дріт (1). Кінці дроту припаяні до мідних утримувачів конічної форми (2), що гвинтовими затискувачами прикріплюються до мідних стрижнів (3).

Укріплені на знімній рамці (4) мідні стрижні та дослідний елемент опускаються у скляну ємність (5), заповнену дистильованою водою.

Підігрів дослідного елемента здійснюється змінним електричним струмом, який підводиться від мережі 220 В через рубильник (6) і регулюємий понижуючий автотрансформатор (7). Сила струму, що проходить через робочий елемент, вимірюється амперметром A через трансформатор струму (8). Спад напруги на дослідному елементі вимірюється вольтметром.

Температура води в ємності вимірюється ртутним термометром (9). Для підігріву води до заданої величини недогріву в ємності встановлений електропідігрівач (10).

Характеристика робочого елемента: зовнішній діаметр $D=0,2 \cdot 10^{-3}$ м.

5 ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДУ

Після ознайомлення зі змістом роботи і установкою заготовити форму табл. 3.1 для запису спостережень. Після цього перевірити чи правильно зібрана схема (рис. 3.1) та виставити стрілки приладів на нуль.

Заміряти довжину робочого елемента 1 за допомогою лінійки та записати результат до табл. 3.1. Після чого прикріпити елемент до мідних стрижнів (3) та опустити його у ємність (5).

Увімкнувши на деякий час електропідігрівач, встановити температуру, води у ємності на рівні, заданому викладачем. Ввімкнути рубильник (6) і за допомогою автотрансформатора (7) поступово збільшувати силу струму, що проходить через робочий елемент.

З нагрівом елемента, на його поверхні виникають парові бульбашки, кількість яких зростає із збільшенням густини теплового потоку q . При тепловому навантаженні, відповідному величині $q_{кр1}$ відбувається різкий перехід від бульбашкового кипіння до плівкового, температура дроту стрибкоподібно зростає і дослідний елемент перегорає.

В цей момент необхідно зафіксувати і записати до табл. 3.1 покази амперметра, вольтметра і термометра. Після цього рамка зі стрижнями виймається з ємності, елемент, що перегорів, разом з утримувачами замінюється новим, і дослід повторюється при температурі води, що перевищує початкову на $15...20$ °С. Всього проводиться 3 досліди при різних початкових температурах рідини.

6 ОБРОБКА ДОСЛІДНИХ ДАНИХ.

1. За виміряними довжинами робочих елементів (табл. 3.1) необхідно розрахувати площу поверхні тепловіддачі кожного робочого елементу:

$$F = \pi D l, \quad (3.3)$$

де D та l – зовнішній діаметр та довжина робочого елементу відповідно, м.

Отримані значення площ необхідно записати до табл. 3.1.

2. Покази амперметра і вольтметра переводяться в ампери і вольти з урахуванням ціни поділки приладів та записуються до табл. 3.1. Значення критичної густини теплового потоку обчислюються за формулою:

$$q_{кр1} = \frac{I_{кр} \Delta U_{е.кр}}{F}, \quad (3.4)$$

де $I_{кр}$ – сила струму, що протікає через робочий елемент в момент кризи теплообміну, А;

$\Delta U_{е.кр}$ – спад напруги на робочому елементі в момент кризи теплообміну, В;

F – тепловіддаюча поверхня робочого елементу, розрахована за формулою (3.3), м².

3. Обчислити величину недогріву для кожного досліду $\vartheta = t_n - t_p$, прийнявши температуру насичення при атмосферному тиску $t_n = 100$ °С.

3) Одержані значення $q_{кр1}$ та ϑ занести до табл. 3.1 і побудувати графік $q_{кр1} = f(\vartheta)$.

7 ПОРІВНЯННЯ ДОСЛІДНИХ ДАНИХ З РОЗРАХУНКОВИМИ

Для зіставлення отриманих дослідних даних з розрахунковими необхідно визначити $q_{кр1}$ за формулою (3.2) для недогрівів води, що мають місце у досліді. Значення фізичних властивостей води ρ' , ρ'' , γ , σ , c необхідно знайти у відповідних довідниках.

Отримані за формулою (3.2) значення $q_{кр1}$ необхідно відкласти на графіку $q_{кр1} = f(\vartheta)$.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Особливості бульбашкового і плівкового режимів кипіння.
2. Причина стрибкоподібного зростання температури поверхні в момент кризи.
3. Вплив недогріву на величину критичної густини теплового потоку.
4. Методика проведення дослідів з дослідження кризи в у великому об'ємі.
5. Обробка дослідних даних.
6. Аналіз величин, що входять в аналітичні залежності по визначенню $q_{кр1}$.

Таблиця 3.1 – Результати проведення дослідів

№№ пп	l, м	t _p , °C	Спостереження				Результати досліду		
			I _{кр}		$\Delta U_{e.кр}$		F, м ²	ϑ , °C	q _{кр1} , Вт/м ²
			поділки	А	поділки	В			
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									
9.									
10.									
11.									
12.									

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Исаченко В.П. Теплопередача [Текст] / Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 416 с.
2. Михеев М.А. Основы теплопередачи [Текст] / Михеев М.А., Михеева И.М. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена [Текст] / Кутателадзе С.С. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
4. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче [Текст] / Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. – Л.-М.: Государственное энергетическое издательство, 1959. – 416 с.