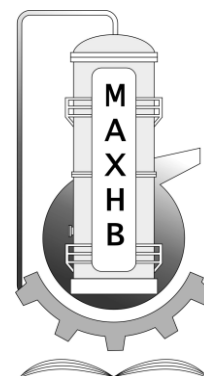


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»



# ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІННИКА З РЕБРИСТОЮ ПОВЕРХНЕЮ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

з кредитного модуля

”Процеси, апарати і машини галузі-1. Основи теплопередачі”

Київ-2017

Дослідження теплообмінника з ребристою поверхнею: [Електронний ресурс]: метод. вказівки до виконання лабораторної роботи для студентів, які навчаються з кредитного модуля ”Процеси, апарати і машини галузі-1. Основи теплопередачі”/ КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад. М.П. Швед, Д.М. Швед, А.Р. Степанюк. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 13 с.

Гриф надано Вченою радою  
інженерно-хімічного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(Протокол № 2 від 27 березня 2017 р.)

Для студентів інженерно-хімічного факультету

Табл. 2. Бібліогр. назв. 2

Відповідальний редактор: Дахненко Валерій Лонідович доцент, к.т.н.

Рецензенти:

Сокольський Олександр Леонідович, доцент, к.т.н.

*Навчальне видання*

Швед Микола Петрович,  
Швед Дмитро Миколайович,  
Степанюк Андрій Романович,

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОБМІННИКА З РЕБРИСТОЮ ПОВЕРХНЕЮ**

методичні вказівки вказівки  
до виконання лабораторної роботи  
з кредитного модуля  
”Процеси, апарати і машини галузі-1. Основи теплопередачі”

## **1 ВСТУП. МЕТА ТА ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Трубчато–ребристі теплообмінники досить широко використовуються в техніці. Оребрення поверхні проводять при виробництві калориферів, конденсаторів і випарників компресорних холодильних установок, опалювальних радіаторів, економайзерів парових котлів, компресорів та двигунів згорання з повітряним охолодженням та багатьох інших машин та апаратів [1...4].

Трубчато–ребристі теплообмінники це пучки труб з рядом поперечних або поздовжніх ребер. При цьому ребра можуть бути виконані у вигляді пластин круглої або квадратної форми, гвинтової стрічки або дроту, відливок з постійним або перемінним перерізом ребра та т. ін. Для нормальної роботи ребристих теплообмінників ребра необхідно виготовляти із матеріалів з високим коефіцієнтом теплопровідності і забезпечувати надійний контакт між основою ребер та трубками.

Наявність ребер на стінці дозволяє збільшити поверхню контакту з теплоносієм і тим самим зменшити термічний опір тепловіддачі. При цьому зменшується термічний опір теплопередачі та збільшується тепловий потік, а температура такої стінки наближається до температури теплоносія. Тому оребрення поверхні використовується як конструктивний засіб інтенсифікації процесу теплопередачі та (або) зниження температури стінки. В таких випадках за допомогою ребер збільшують поверхню теплообміну стінки з тієї сторони, де значення коефіцієнта тепловіддачі менше.

Мета роботи – експериментально дослідити тепловіддачу при охолодженні повітря в трубчато-ребристому випарнику. При цьому необхідно виконати наступні задачі:

1. експериментально визначити коефіцієнти тепловіддачі при різних значеннях числа Рейнольдса для повітря, що охолоджується в трубчато-ребристому теплообміннику;

2. отримати в явному вигляді рівняння подібності для випадку тепловіддачі від повітря до ребристої поверхні.

## 2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Розділ викладено за авторами [1...4]. Випарники компресійних холодильних установок, це в більшості випадків пучок труб, які оребрені рядом суцільних металевих листів. Розглянемо особливості тепловіддачі таких ребристих теплообмінників.

Будь-яка оребрена поверхня складається з поверхні  $F_p$  ребер і поверхні  $F_{MP}$  ділянок труб, які не зайняті ребрами. В загальному випадку розміри, температура і коефіцієнти тепловіддачі цих поверхонь різні. Тому усереднений тепловий потік  $Q$ , яким обмінюється оребрена поверхня із теплоносієм (наприклад повітрям), буде складатися із теплових потоків, які віддані чи отримані ребрами  $Q_p$  і міжреберними ділянками  $Q_{MP}$ . В відповідності до закону Ньютона-Ріхмана для випадку охолодження теплоносія будемо мати

$$Q = Q_p + Q_{MP} = \alpha(t_n - t_c)F_p + \alpha_0(t_n - t_0)F_{MP} \quad (1)$$

де  $\alpha, \alpha_0$  - відповідно середні коефіцієнти тепловіддачі ребер і міжреберних ділянок,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ ;

$t_n, t_c, t_0$  - відповідно середні температури повітря, поверхні ребер та міжреберних ділянок, К.

Для розглядуваного трубчатого теплообмінника із суцільними пластинчатими ребрами можна прийняти, що  $F_p \gg F_{mp}$ ),  $\alpha = \alpha_0$  і  $t_c = t_0$ . Тому рівняння (1) можна записати в такому вигляді

$$Q = \alpha(t_n - t_c)F = \alpha\Delta t_{cp}F, \quad (2)$$

де  $F = F_p + F_{mp}$  - загальна поверхня теплообміну,  $m^2$ ;

$\Delta t_{cp} = t_n - t_c$  - середній температурний напір, К.

Умови обтікання пучка труб с пластинчатими ребрами наближаються до умов руху теплоносія всередині плоских каналів. Звідси, для випадку тепловіддачі повітря до таких ребристих поверхонь рівняння подібності можна записати в такому вигляді

$$Nu = c Re^n, \quad (3)$$

де  $Nu$  - середнє число Нуссельта;

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (4)$$

$l$  - визначальний геометричний розмір

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності повітря,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$

$Re$  - середнє число Рейнольдса;

$$Re = \frac{Wl}{\nu} \quad (5)$$

$W$  - середня швидкість руху повітря,  $\frac{м}{с}$ ;

$\nu$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря,  $\frac{м^2}{с}$ ;

$c, n$  - сталі безрозмірні числа.

В формулі (3) в якості визначаючої температури прийнята середня температура повітря  $t_n$ :

$$t_n = \frac{t_{n_1} + t_{n_2}}{2}$$

А в якості визначаючого геометричного розміру  $l$  - еквівалентний діаметр  $d_e$

$$d_e = \frac{2lB}{l+B}, \quad (6)$$

де  $B$  - відстань між ребрами, м;

$l$  - довжина ребра, м.

Логарифмуємо рівняння (3):

$$\ln Nu = \ln C + n \cdot \ln Re$$

Ми бачимо, що в координатах  $\ln Re$  і  $\ln Nu$  рівняння (3) повинно представляти пряму. Відрізок, який відтинається цією прямою на осі ординат, дорівнює  $\ln C$ :

$$n = \operatorname{tg} \varphi = \frac{a}{b}, \quad (7)$$

де  $\varphi$  - кут нахилу прямої до осі абсцис (рис. 1).

Це надає можливість на основі експериментальних даних порівняно просто визначити величини  $c$  та  $n$ . Для цього необхідно ці дані представити в координатах  $\ln Re$  та  $\ln Nu$  через дослідні точки провести усереднену пряму, після чого вищевказаним способом визначити  $C$  та  $n$ .

Слід відмітити також, що сталу  $C$  можна визначити із рівняння

$$C = \frac{Nu^n}{Re}, \quad (8)$$

якому задовольняє будь-яка точка усередненої прямої.

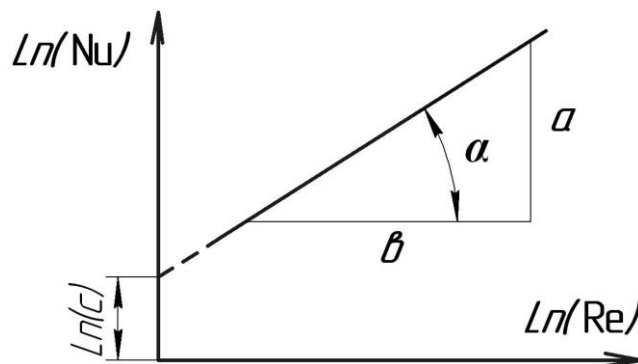


Рисунок 1 – До встановлення залежності вигляду  $Nu = C \cdot Re^n$

### 3. ОПИС УСТАНОВКИ

На рисунку 2 представлена спрощена схема експериментальної установки для дослідження тепловіддачі від повітря до ребристої поверхні випарника. На цій схемі умовно не показано компресор, конденсатор і інші пристрої фреонової холодильної установки, оскільки в цій частині роботи вони мають допоміжне значення (служать для подачі в випарник фреону при заданому тиску). Повна схема холодильної установки наведена в лабораторній роботі «Дослідження парової одноступінчастої холодильної машини».

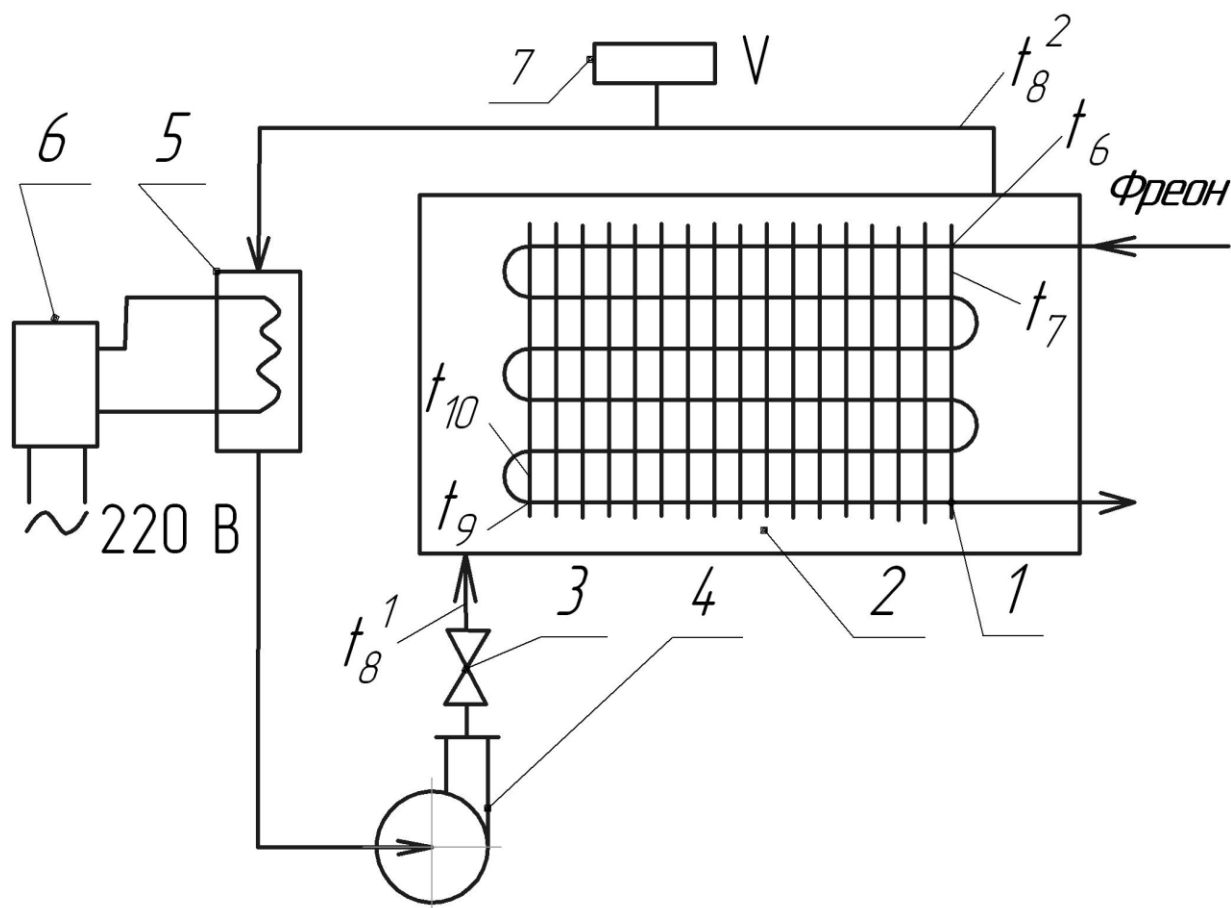
Установка являє собою замкнутий по ходу повітря контур, що включає тепло – ізольовану холодильну камеру 2 з випарником 1, вентилятор 4, шибер 3, електронагрівник 5, який підключається до електромережі через регулятор напруги 6 (Рис. 2).

Випарник 1 складається з двох секцій U-подібних пучків труб, оребрених рядом паралельних пластин. Зовнішній діаметр труб  $d_3 = 19\text{мм}$ , довжина одної труби 156 мм, їх загальна кількість рівна 48, довжина пластин  $l = 460\text{мм}$ , ширина 500 мм, товщина  $S = 0,4\text{ мм}$ , їх загальна кількість 173, відстань між ними  $B = 12,5\text{ мм}$ . Загальна поверхня випарника  $F = 80\text{м}^2$ , площа вільного поперечного перерізу  $f = 0,795\text{ м}^2$ . По трубах випарника циркулює фреон.

Повітря, що подається вентилятором 4, охолоджується в холодильній камері 2 до температури  $t_8^2$ . Для того, щоб можна було підтримувати сталою задану температуру  $t_8^1$  повітря, на вході в камеру 2, передбачено електронагрівник 5. Електрична потужність, що подається на нього, регулюється з допомогою регулятора 6. Шибер 3 призначений для зміни об'ємних витрат повітря (числа  $Re$ ).

На вході й виході з випарника в пластинах встановлені по дві хромель-копелеві термопари, які вимірюють температури в центрі проміжку між трубами  $t_7$  і  $t_{10}$ , а також в точках контакту ребер з трубами  $t_6$  і  $t_9$ . Температури  $t_8^1$  і  $t_8^2$  повітря на вході й на виході з холодильної камери вимірюються з допомогою хромель-копелевих термопар, встановлених у вхідному й вихідному патрубках камери. Показання всіх шести термопар знімаються потенціометром (на рисунку не показаний).

Об'ємна витрата  $V$  повітря вимірюється трубкою Піто-Прандтля і диференціальним мікроманометром 7. Напірна трубка встановлена вздовж осі вихідного трубопроводу, відкритим кінцем назустріч потоку повітря.



- 1 – випарник; 2 – ізольована холодильна камера; 3 – шибер;  
 4 – вентилятор; 5 – електронагрівник; 6 – регулятор напруги;  
 7 – диференціальний мікроманометр

Рисунок 2 – Схема установки



#### 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Експеримент слід проводити у наступній послідовності:

1. Увімкнути компресор холодильної установки (див. лабораторну роботу “Дослідження парової одноступінчастої холодильної машини”)
2. Після того, як тиск на всмоктуючій лінії холодильної установки знизиться до  $1,2 \cdot 10^4 - 1,3 \cdot 10^4$  Па, включити вентилятор.
3. За допомогою шибера встановити необхідну витрату повітря; рекомендується підтримувати витрати повітря в межах  $180-330$  м<sup>3</sup>/год, графік градування трубки Піто – Прандтля знаходиться на рисунку 3.
4. Ввімкнути електронагрівач, температуру повітря, що подається в холодильну камеру, рекомендується підтримувати в межах  $293 - 313$  К.
5. Встановити квазістаціонарний режим роботи установки, про що свідчитиме незмінність усереднених в часі показів контрольно-вимірювальних приладів.
6. Виміряти й записати в таблицю 1 наступні величини:
  - а) температури повітря  $t_8^1$  і  $t_8^2$ , а також температури  $t_6, t_7, t_9, t_{10}$  пластин на вході і виході з холодильної камери;
  - б) об’ємну витрату  $V$  повітря, при цьому слід скористатися графіком градування трубки Піто – Прандтля ( рисунок 3).
7. Перейти на наступний квазістаціонарний режим, виміряти і записати в таблицю 1 величини згідно пункту 6 та т. ін. Рекомендується дослідити 5 – 6 різних квазістаціонарних режимів роботи установки, розбивши рівномірно весь інтервал продуктивності установки.
8. За допомогою регулятора напруги знизити до нуля напругу, що подається на електронагрівач, і відімкнути електронагрівач від електромережі.
9. Вимкнути компресор холодильної установки.
10. Вимкнути вентилятор.

Без дозволу викладача студентам категорично забороняється вмикати установку та прилади.

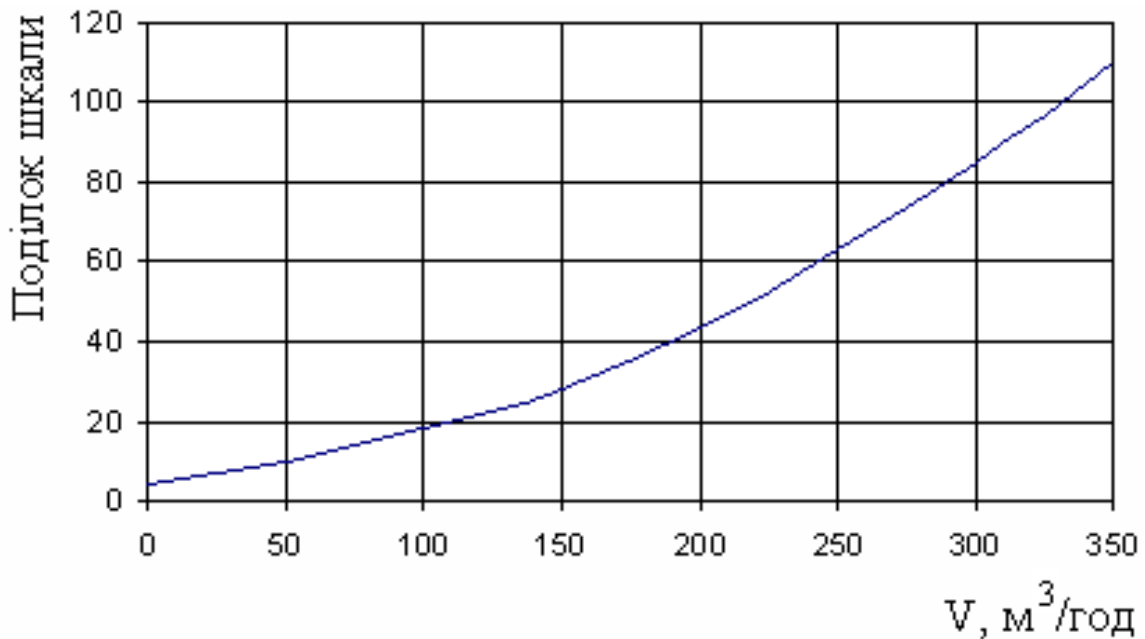


Рисунок 3 – Графік градування трубки Піто – Прандтля.

## 5. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Обробку результатів експерименту слід проводити у наступному порядку.

1. Визначити середні температури повітря за рівнянням:

$$t_n = \frac{t_8^1 + t_8^2}{2}$$

2. Знайти середній температурний напір по формулі:

$$t_{сеп} = t_n - \frac{t_6 + t_7 + t_9 + t_{10}}{4}$$

3. Визначити середні коефіцієнти тепловіддачі за рівнянням:

$$\alpha = \frac{Q}{F \Delta t_{cp}} = \frac{V \rho C_p (t_8^1 - t_8^2)}{F \Delta t_{cp}}$$

де  $\rho$  – густина повітря при середній температурі кг/м<sup>3</sup>;

$c_p$  – питома теплоємність повітря при середній температурі повітря  $t_n$  Дж/(кг К).

4. Розрахувати за формулою (4) середні числа Nu, а потім  $\ln Nu$ .

5. Визначити середні швидкості  $W$  руху повітря за рівнянням

$$W = \frac{V \rho}{f}, \text{ м/с.}$$

6. Знайти за формулою (5) середні числа Re, а далі  $\ln Re$ .

7. Нанести на графік експериментально знайдені значення  $\ln Re$  і  $\ln Nu$  і провести усереднюючу пряму.

8. Знайти по формулах (7) і (8) значення сталих величин  $C$  і  $n$ .

9. Результати обробки даних вимірювань занести до таблиці 2.

10. Записати у явному вигляді рівняння подібності (3).

## 7. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для аналізу результатів експериментів слід розв'язати задане у явному вигляді рівняння подібності відносно коефіцієнта  $\alpha$  і визначити вклад кожної з величин  $W$ ,  $d$ ,  $\lambda$ ,  $\nu$  в інтенсивність тепловіддачі. Привести висновок по роботі згідно до поставленої мети.

## 8. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. З якою метою проводять обрешітлення теплообмінних поверхонь?

2. Проаналізуйте умови застосування закону Ньютона – Ріхмана до ребристої поверхні теплообміну.

3. Запишіть і проаналізуйте рівняння подібності для трубчастого теплообмінника з пластинчастими ребрами

4. Опишіть і проаналізуйте схему експериментальної установки.

5. Опишіть порядок запуску та зупинки установки.

6. Опишіть методику визначення коефіцієнта тепловіддачі для ребристої поверхні теплообмінника

7. Опишіть методику визначення сталих  $C$  і  $n$  в рівняннях подібності (3).

8. Проаналізуйте вплив швидкості потоку на процес тепловіддачі до повітря, що охолоджується в трубчато-ребристому теплообміннику.

### Теплофізичні властивості сухого повітря [7]:

– густина,  $\text{кг}/\text{м}^3$ :  $\rho_n = 1,29281 - 4,782143 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,797631 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$

– теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ :  $C_{p_n} = 1005,952 - 1,285717 \cdot 10^{-4} \cdot t + 3,33332 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$

– теплопровідність,

$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ :  $\lambda_n = 2,436667 \cdot 10^{-2} + 7,78571 \cdot 10^{-5} \cdot t - 2,379922 \cdot 10^{-8} \cdot t^2$

– коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $\text{м}^2/\text{с}$ :

$$\nu_n = (13,45 + 0,07810715 \cdot t + 1,321419 \cdot 10^{-4} \cdot t^2) \cdot 10^{-6}$$

### ЛІТЕРАТУРА

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С., Теплопередача. Изд. 3-тє, перераб. и доп., «Енергия», М, 1976.

2. Теоретические основы тепло- и холодильной техники, часть II. Теплообмен. Под совсм. ред. проф. Е.И. Гуйго, Изд. Ленинградского университета, Л., 1976.

3. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1973.-752с.

4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков В.Н. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

Таблиця 1 – Результати прямих вимірів

№ дослід	$t_8^1$ , К	$t_8^2$ , К	$t_6$ , К	$t_7$ , К	$t_9$ , К	$t_{10}$ , К	$V$ , м <sup>3</sup> /с
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Таблиця 2 – Результати обробки вимірів

№ дослід	$t_n$ , К	$t_{сер}$ , К	$\alpha$ , $\frac{Вт}{м \cdot К}$	Nu	lnNu	$W$ , м/с	Re	lnRe
1								
2								
3								
4								
5								
6								