

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

ГІДРАВЛІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЦЕНТРОВОЇ ФОРСУНКИ

Методичні вказівки до лабораторної роботи
з курсів «Теплотехнічні процеси та установки промислових
підприємств» і «Кондиціонування повітря»
для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»
усіх форм навчання

Затверджено

редакційно-видавничою

радою університету,

протокол № 1 від 19.02.2020 р.

Харків
НТУ «ХП»

2020

Гідравлічні дослідження відцентрової форсунки: методичні вказівки до лабораторної роботи з курсів «Теплотехнічні процеси та установки промислових підприємств» і «Кондиціонування повітря» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» усіх форм навчання / уклад. О. Р. Пересьолков, О. В. Круглякова. – Харків: НТУ "ХП", 2020. – 20 с.

Укладачі: О. Р. Пересьолков

О. В. Круглякова

Рецензент С. В. Угольніков

Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій

ВСТУП

В контактних тепломасообмінних апаратах, таких як градирні, скрубери, камери зрошення центральних кондиціонерів повітря й т. і., для створення розвиненої поверхні контакту рідини й повітря використовуються відцентрові форсунки.

У **насадкових апаратах**, в яких насадка (наприклад, зрошувач градирні) призначена для створення стійкої поверхні контакту води і газів, форсунки забезпечують рівномірний розподіл рідини по поверхні насадки.

У **безнасадкових** (порожніх) апаратах за допомогою форсунок створюється рівномірне заповнення краплями поперечного перерізу апарата так, щоб не було таких ділянок, на яких газ міг би пройти між факелами диспергованої рідини без контакту з краплями.

Принцип роботи відцентрової полофакельної форсунки полягає в наступному. Потрапляючи в форсунку, рідина набуває обертальний рух за рахунок тангенціального підведення її в камеру закручування (рис. 1, а, б) або за рахунок використання циліндричної вставки з гвинтовими канавками (рис. 1, в). Із сопла форсунки рідина виходить у вигляді тонкої плівки, що обертається, заповнюючи при цьому не більше 20–30 % площі сопла. На виході з сопла за рахунок відцентрових сил плівка набуває форми полого конуса й потім розпадається на фрагменти й краплі.

Відцентрові форсунки при досить великих прохідних отворах є маловитратними й менше піддаються засміченню, однак, на поверхню зрошувача крапельний потік приходить у вигляді кільця. Тому основним завданням є раціональне розміщення форсунок в апараті.

На етапі проектування апарата після вибору форсунки певного типорозміру для визначення необхідної кількості форсунок потрібна її видаткова характеристика, тобто залежність об'ємної витрати води V_{ϕ} від перепаду тиску на форсунці ΔP .

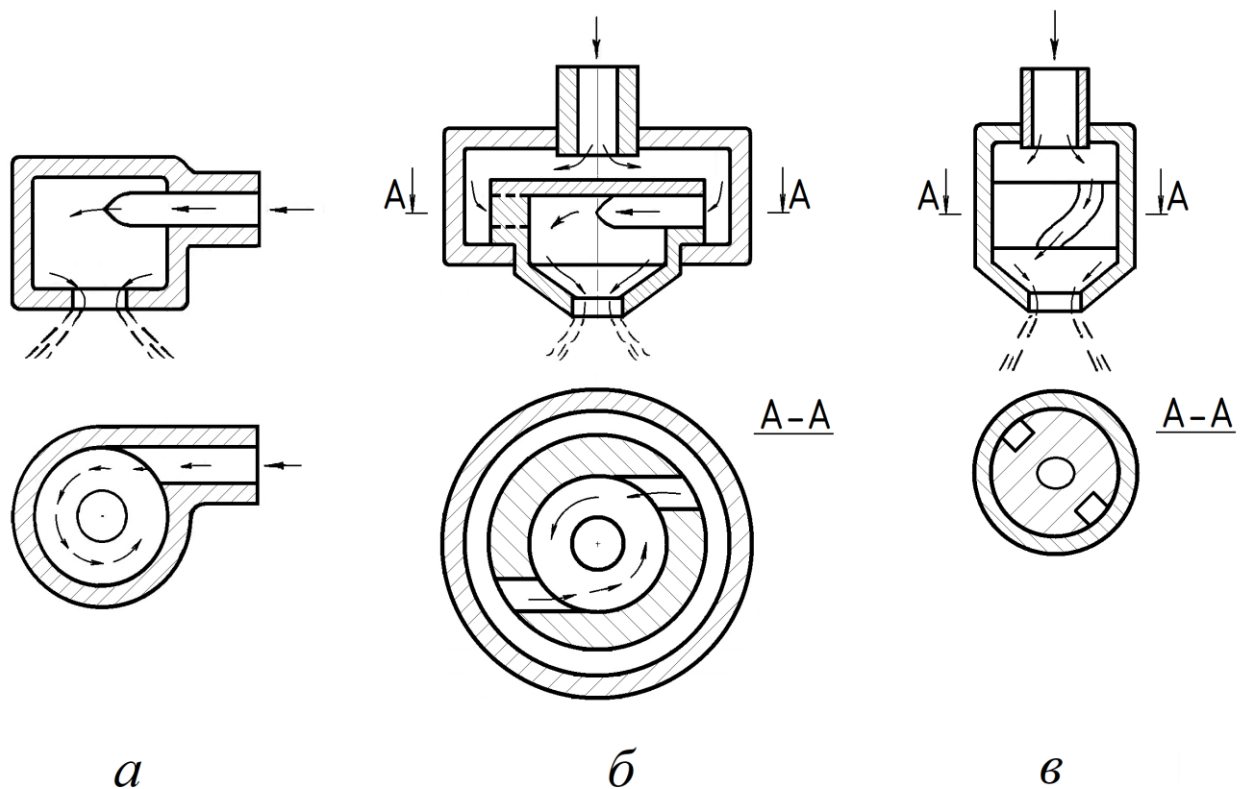


Рисунок 1 – Схеми відцентрових полофакельних форсунок:

a – форсунка з одним підвідним каналом;

б – форсунка з двома підвідними каналами;

в – форсунка з циліндричною вставкою з гвинтовими каналами

Також для оптимального розміщення форсунок в апараті необхідно знати структуру крапельного потоку, що продукується форсункою на різних режимах її роботи, тобто поле густини зрошення в поперечному перетині факела крапельного потоку на заданих відстанях від сопла, кути розкриття факела й форму зони зрошення.

Мета лабораторної роботи: практичне знайомство з конструкціями, принципом дії та режимами роботи відцентрових форсунок, які застосовуються в контактних тепломасообмінних апаратах, проведення на стенді гідравлічних випробувань відцентрової форсунки й аналіз отриманих експериментальних характеристик.

Завдання дослідження: експериментальне дослідження гідравлічних характеристик відцентрової форсунки, тобто побудова її видаткової характеристики й епюри розподілу густини зрошення в поперечному перетині крапельного потоку, що продукується відцентровою форсункою.

1 СХЕМА Й ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Схему експериментальної установки показано на рис. 2.

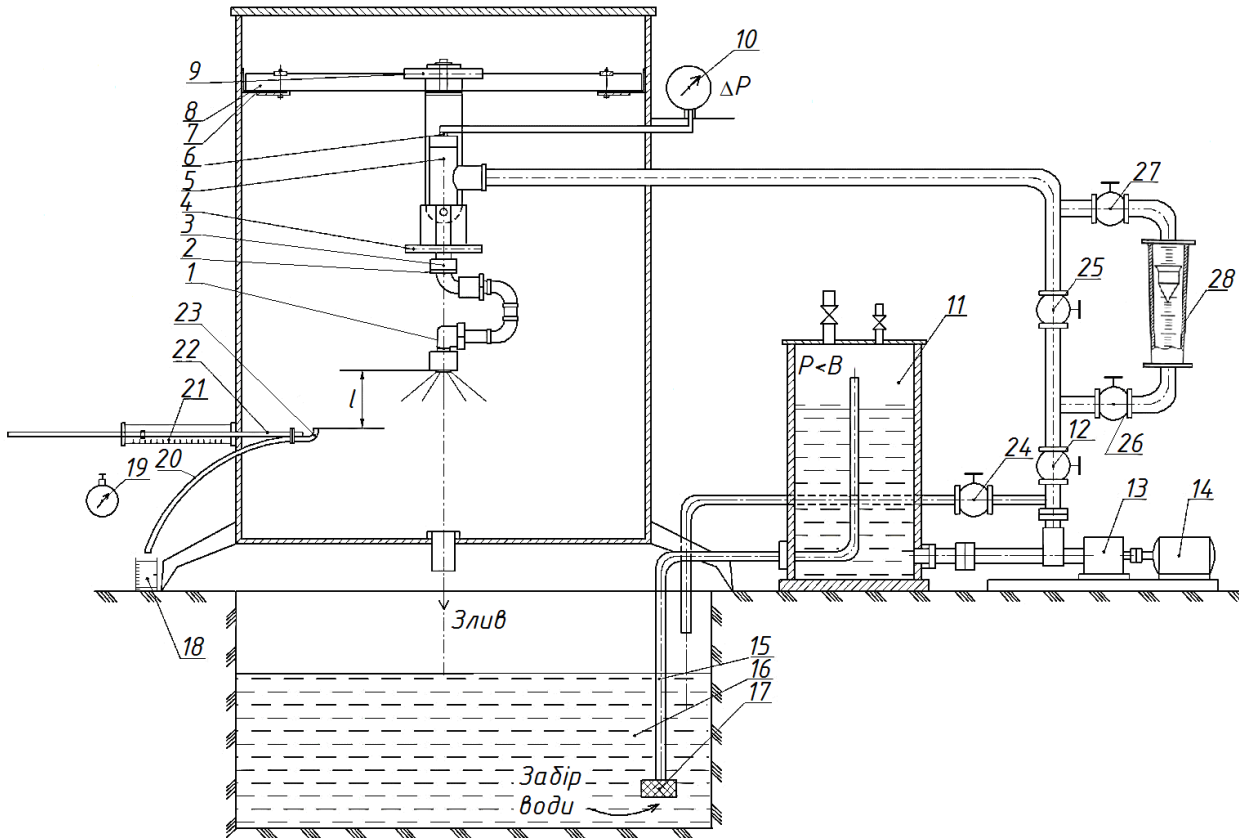


Рисунок 2 – Схема експериментальної установки:

1 – форсунка; 2 – контргайка; 3 – муфта; 4 – лімба; 5 – трійник; 6 – імпульсна трубка для відбору тиску перед форсункою; 7 – опора координатника; 8 – санчата координатника; 9 – координатник для переміщення; 10 – манометр; 11 – бак проміжний вакуумний; 12 – вентиль регулювальний; 13 – насос; 14 – електродвигун; 15 – труба для забору води з баку, який розташований нижче рівня установки насоса; 16 – бак; 17 – фільтр; 18 – вимірювальна ємність; 19 – секундомір; 20 – трубка для відводу води з відбірника; 21 – координатник для переміщення відбірної трубки; 22 – штанга для переміщення відбірника; 23 – відбірник; 24 – вентиль байпасного зливу води; 25, 26, 27 – крани; 28 – скляний ротаметр

Циркуляційний контур води. Вода забирається насосом 13 з вакуумного бака 11. Тиск в баку 11 становиться нижче за атмосферний, отже, за рахунок вакууму вода з основного бака 16, де рівень нижче рівня установки насоса, підіймається в бак 11. Як наслідок, робоче колесо насоса

постійно знаходиться в зануреному стані. Після розпилення форсункою вода знову потрапляє до бака 16.

Розміщення форсунки. Форсунка переміщується в камері за допомогою координатника 8, який рухається санчатами 9, що закріплені на опорах 7. Перепад тиску води на форсунку ΔP регулюється вентилями 12 і 24 та контролюється манометром 10.

Вода від насоса до форсунки подається через трійник 5, який забезпечує подачу води в форсунку через нижній отвір і підключення в своїй верхній частині імпульсної трубки для вимірювання тиску води перед форсункою. У верхній частині трійника швидкість потоку води дорівнює нулю, отже, динамічний тиск є відсутнім. Цей факт забезпечує коректність вимірювання тиску води.

Для вимірювання об'ємної витрати води, яка подається на форсунку, встановлений ротаметр 28. Крани 25, 26, 27 передбачені для відключення скляного ротаметра під час пуску установки, тому що в трубці можливий гідравлічний удар.

Дослідження факела форсунки. Дослідження факела форсунок здійснюється з використанням відбірної трубки 23, яка за допомогою координатника 21 встановлюється в конкретній точці в поперечному перетині факела крапельного потоку на відстані l від гирла форсунки. З відбірника 23 рідина трубкою 20 потрапляє до вимірювальної ємності 18. Час відбору диспергованої води з крапельного потоку вимірюється секундоміром 19.

2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

2.1 Експериментальне визначення витратної характеристики форсунки

Витратна характеристика форсунки це залежність витрати робочої рідини через форсунку V_f , від перепаду тиску на ній ΔP .

2.1.1 Експериментальне визначення витратної характеристики форсунки за допомогою ротаметра

Експеримент проводиться в наступній послідовності.

1. На манометрі 10 встановити необхідний надлишковий тиск P_m перед форсункою за допомогою вентилів 12 і 24 (рис. 2).

2. На ротаметрі 28 зафіксувати кількість поділок N і за допомогою його градуювальної характеристики (рис. 3) визначити об'ємну витрату води через форсунку $V_{\text{ф}}$, яка відповідає заданому перепаду тиску $\Delta P = P_{\text{м}}$.

3. Повторити пункти 1-2 для інших значень надлишкових тисків.

Для отримання витратної характеристики форсунки необхідно здійснити 7–10 досліджень.

Результати вимірювань заносяться до табл. 1.

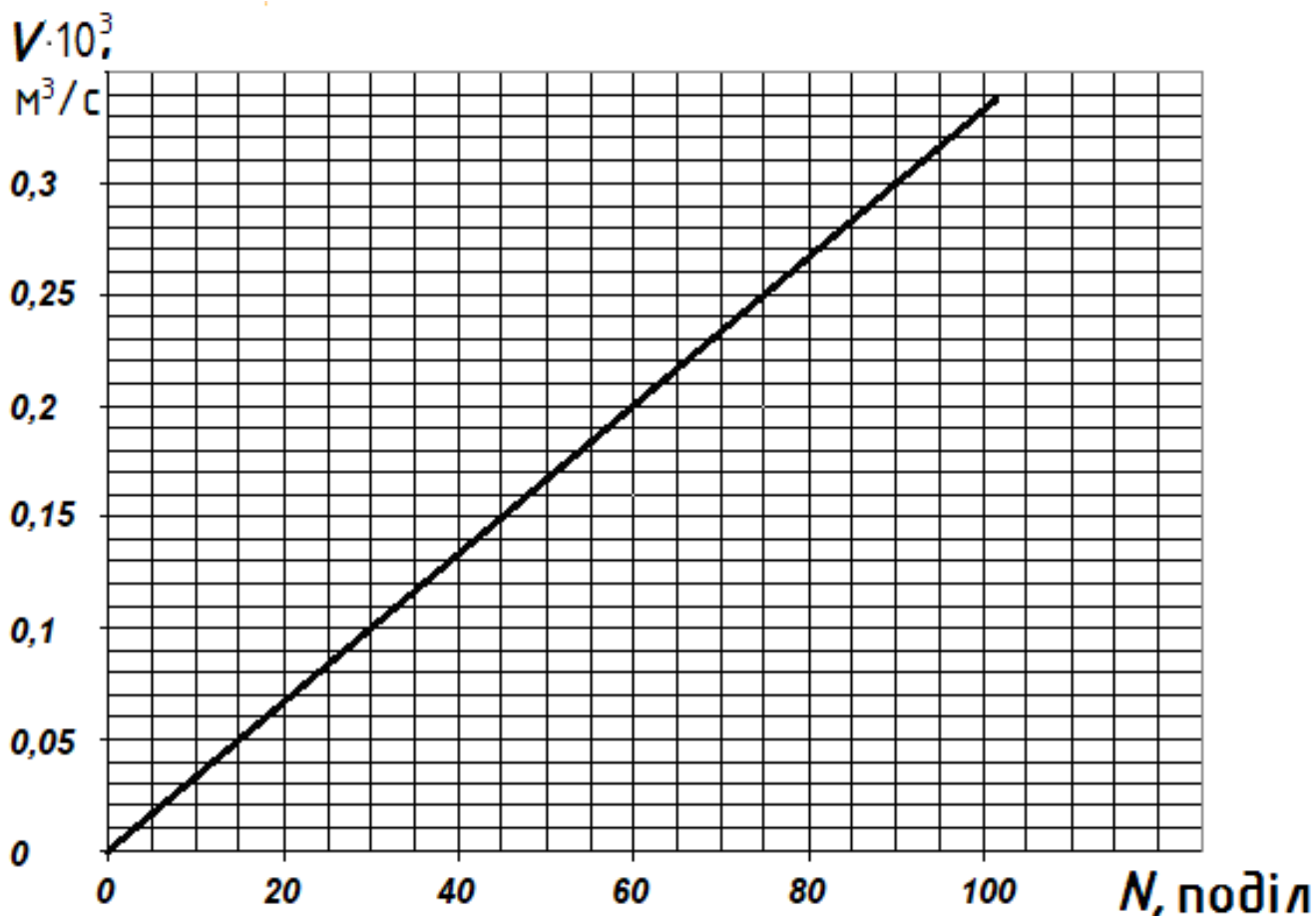


Рисунок 3 – Градувальна характеристика ротаметра

Таблиця 1 – Результати вимірювань витрати води за допомогою ротаметра

Номер дослідження	Перепад тиску води на форсунці ΔP , м.вод.ст.	Показання ротаметра, N , поділка	Витрата води через форсунку V_{ϕ} , м ³ /с
1			
...			
10			

2.1.2 Експериментальне визначення витратної характеристики форсунки ваговим методом

Якщо установка не обладнана витратоміром води, об'ємну витрату води через форсунку можна визначати за допомогою вагового (або об'ємного) методу (рис. 4).

Для реалізації вагового методу на форсунку встановлюється обмежувач факела, який поглинає кінетичну енергію потоку крапель і забезпечує злив всієї води, що виходить з форсунки в мірну ємність.

Послідовність проведення вимірювань.

1. За допомогою вагів визначається маса порожньої сухої мірної ємності M_0 , кг.

2. Встановлюється тиск води перед форсункою. Заповнюється мірна ємність, при цьому фіксується час її заповнення τ , с.

Шляхом зважування визначається маса мірної ємності з рідиною M , кг

3. Визначається маса води $M_{\text{в}}$, яка потрапляє до мірної ємності за час τ , с:

$$M_{\text{в}} = M - M_0,$$

де M – маса мірної ємності з водою; M_0 – маса мірної ємності без води.

4. Розраховується масова витрата води через форсунку, кг/с:

$$G_{\phi} = \frac{M_{\text{в}}}{\tau}.$$

5. Розраховується об'ємна витрата води через форсунку в даному дослідженні, м³/год:

$$V_{\phi} = \frac{G_{\phi}}{\rho_{\text{в}}} 3600,$$

де $\rho_{\text{в}}$ – густина води, кг/м^3 ; $\rho_{\text{в}} = f(t_{\text{в}})$ (табл. А.1).

6. Пункти 1–5 повторюються для 7–10 значень тиску води перед форсункою. Результати заносяться до табл. 2.

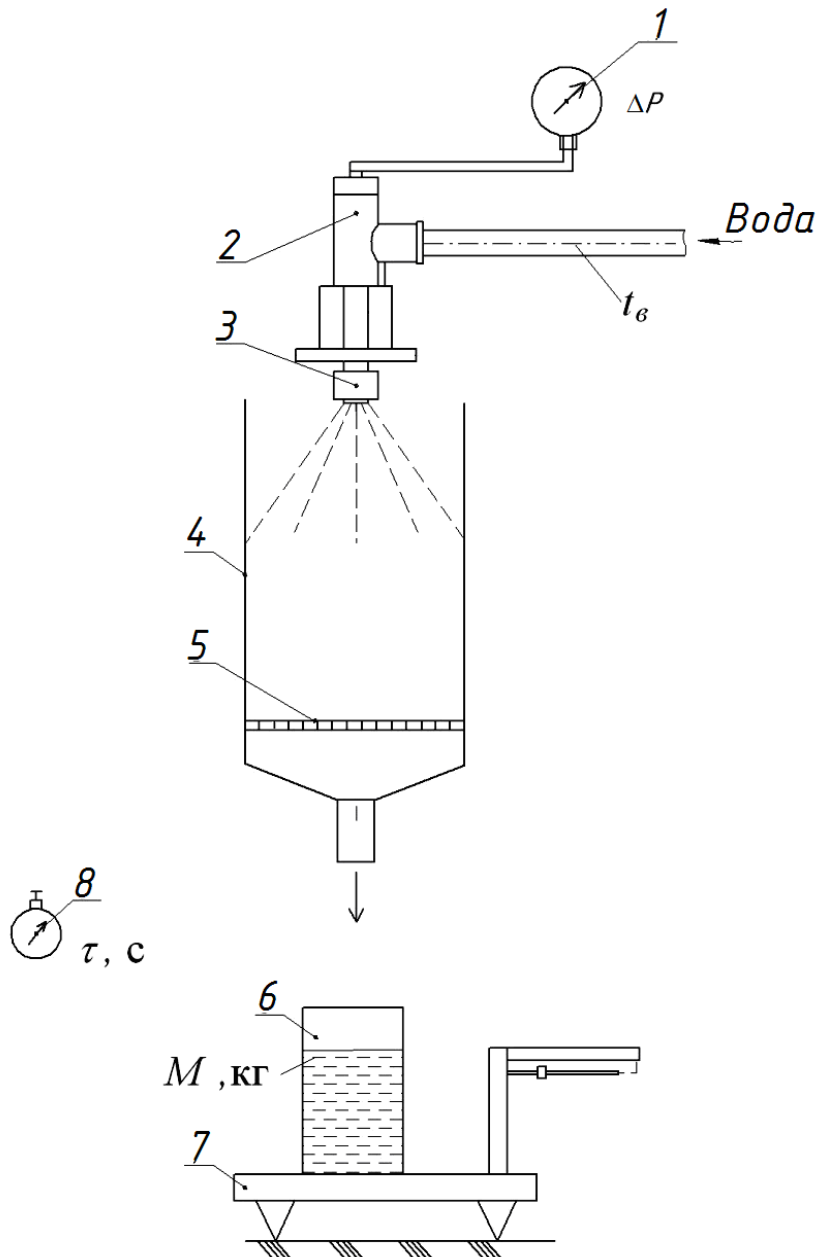


Рисунок 4 – Схема вимірювання витрати води через форсунку ваговим методом: 1 – манометр; 2 – трійник; 3 – форсунка; 4 – обмежувач факела диспергованої води; 5 – сітка; 6 – мірна ємність; 7 – ваги; 8 – секундомір

Таблиця 2 – Результати вимірювань витрати води ваговим методом

Номер дослідження	Перепад тиску води на форсунці ΔP , м.вод.ст.	Час вимірювання τ , с	Маса ємності з водою M , кг	Маса води M_B , кг	Масова витрата води через форсунку Q_M , кг/с	Об'ємна витрата води через форсунку V_ϕ , м ³ /год
1	2	3	4	5	6	7
1						
...						
10						

Після проведення серії дослідів і заповнення табл. 1 і табл. 2 необхідно побудувати витраткову характеристику форсунки (тобто залежність об'ємної витрати води V_ϕ (табл. 2, колонка 7) від перепаду тиску ΔP (табл. 2, колонка 2)). Для цього на графіку з координатами V_ϕ і ΔP наносяться отримані дослідні точки (рис. 5).

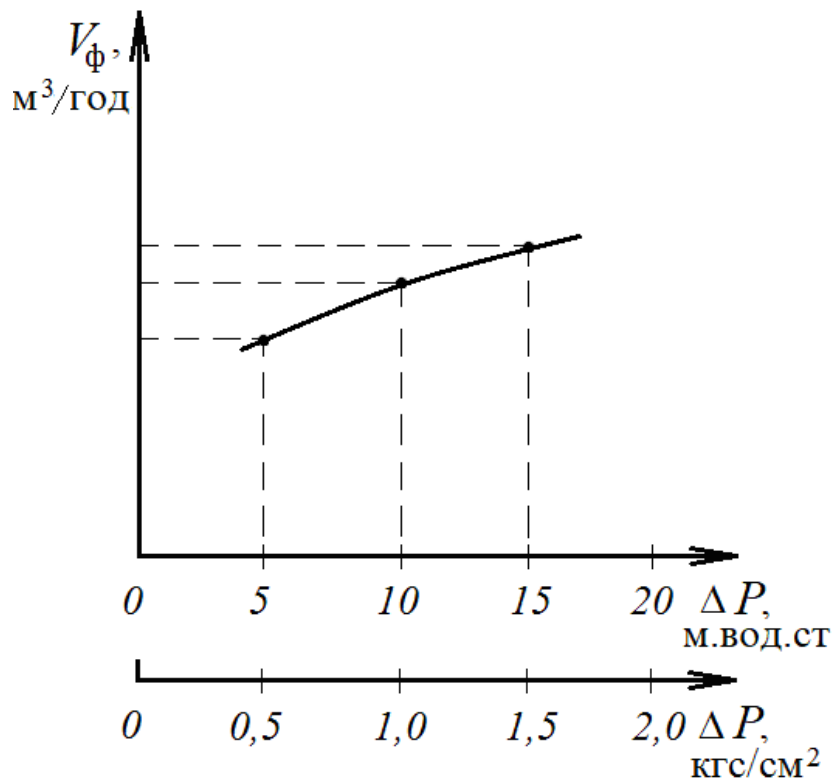


Рисунок 5 – Витратна характеристика форсунки

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПОБУДОВА ЕПЮРИ ГУСТИНИ ЗРОШЕННЯ В ПОПЕРЕЧНОМУ ПЕРЕТИНІ КРАПЕЛЬНОГО ПОТОКУ В ФАКЕЛІ ВІДЦЕНТРОВОЇ ФОРСУНКИ

Локальне значення густини зрошення в довільній точці крапельного потоку – це об’ємна витрата крапельної рідини, яка проходить через дану точку робочого простору контактного апарата.

Для дослідження структури дисперсного потоку крапель, які продукуються відцентровою форсункою, використовується відбірник у вигляді трубки, як показано на рис. 6. Така конструкція відбірників забезпечує ізокінетичний відбір крапель з потоку*.

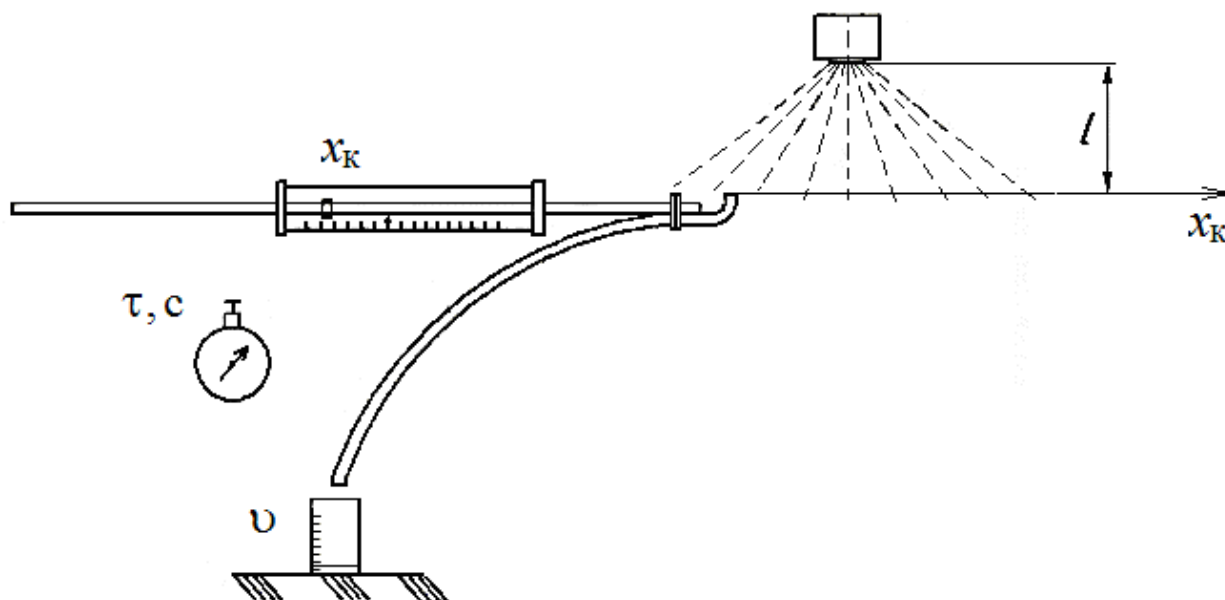


Рисунок 6 – До проведення досліду з вимірювання густини зрошення

Для вимірювання густини зрошення використовується об’ємний спосіб визначення витрати води.

Послідовність проведення вимірювань.

1. Встановити з допомогою координатника відбірник в конкретній точці крапельного потоку, що виходить з форсунки.

Точки вимірювання розташовуються в площині перетину факела, який

*Ізокінетичним вважається такий відбір, при якому краплі й повітря, що ежектується, надходять у отвори добірної трубки з такою ж швидкістю, з якою переміщуються в просторі факела. Завдяки цьому похибка, яка пов’язана з можливим відхиленням і зміною траєкторії руху навіть найдрібніших крапель, виключається.

знаходиться на відстані l від гирла форсунки. Відбірник встановлюється в точках вимірювання, що розташовуються вздовж координати x_k , яка фіксується за шкалою координатника (див. рис. 6).

2. За допомогою мірної ємності виконати вимірювання об'єму v , см^3 , крапельної рідини, яка відбирається з факела форсунки. Час відбору τ , с, фіксується секундоміром.

3. Відбірник за допомогою координатника переміщується по горизонталі в площині перетину факела форсунки в наступну точку, і вимірювання повторюється.

Результати вимірювань заносяться до табл. 3 (колонки 1–3).

Полофакельні відцентрові форсунки з двома й більше підвідними каналами в камеру закручування забезпечують рівномірний розподіл крапельної рідини за колом факела. Тому досить дослідити й побудувати епюру локальних значень густини зрошення вздовж **радіуса** факела в довільному секторі кола перетину факела.

Таблиця 3 – Дослідні та розрахункові дані для визначення локальних значень густини зрошення

Координата точки вимірювання за шкалою координатника x_k , мм	Об'єм води, що відбирається v , см^3	Час відбору τ , с	Об'ємна витрата води		Густина зрошення g , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$
			V_s , $\text{см}^3/\text{с}$	V_h , $\text{м}^3/\text{год}$	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>

Секундна об'ємна витрата розраховується так, $\text{см}^3/\text{с}$:

$$V_s = \frac{v}{\tau},$$

де v – об'єм води, що відбирається та проходить відбірною трубкою в вимірювальну ємність, см^3 ; τ – час, за який проходив відбір, с.

Результат заноситься в колонку 5 табл. 3.

Годинна об'ємна витрата (колонка 6, табл. 3) визначається так, $\text{м}^3/\text{год}$:

$$V_h = V_s \cdot 3600 \cdot 10^{-6} = V_s \cdot 3,6 \cdot 10^{-3}.$$

Густина зрошення (колонка 7 табл. 3) визначається як, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$

$$g = \frac{V_h}{s},$$

де s – площа вхідного отвору відбірної циліндричної трубки, м^2 ,
 $s = 2,57 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ (діаметр цього отвору $d = 18,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$).

За результатами розрахунків (див. табл. 3) будується залежність густини зрошення g від координати горизонтального поперечного перетину факела x_k .

Після побудови точок локальних значень густини зрошення g вздовж координати x_k (як показано на рис. 7) виходять практично симетричні графіки функції розподілу g щодо осі факела. В результаті можливо уздовж осі абсцис нанести шкалу R , тобто шкалу відстані від осі факела вздовж радіуса R в перетині крапельного потоку.

На графік наносяться дві вертикальні шкали: густини зрошення g і висоти від зрізу форсунки до відбірника l . Шкала абсцис являє собою горизонтальне положення по відношенню до осі форсунки x . Для шкал висоти l і відстані x вибирається однаковий масштаб. Це дає можливість графічного визначення кутів розкриття факела (зовнішнього $\beta_{\text{зов}}$, середнього $\beta_{\text{ср}}$ і внутрішнього $\beta_{\text{вн}}$).

На вигляді зверху можна визначити площу між внутрішнім $D_{\text{вн}}$ і зовнішнім $D_{\text{зов}}$ діаметрами факела, на яку випадає рідина. Знаючи цю площу, можна вирішити задачу розміщення форсунок у поперечному перерізі контактного апарата з тим, щоб з одного боку, задіяти мінімально можливу кількість форсунок, а з іншого – забезпечити необхідну густину зрошення поверхні насадки, або в перерізі робочого простору безнасадкового крапельного контактного апарата. На рис. 8 показано, як формується сумарна густина зрошення при груповій роботі форсунок.

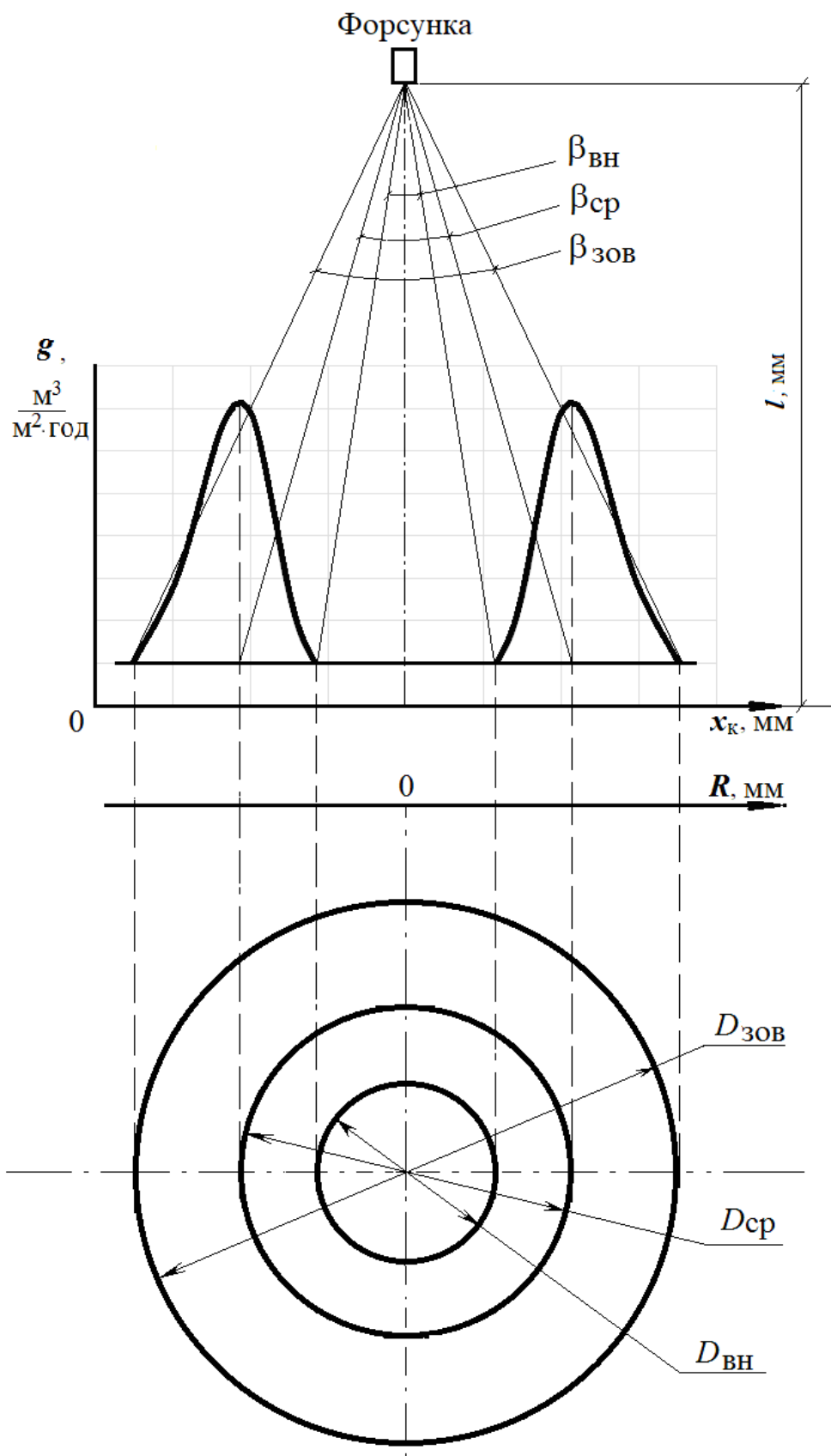


Рисунок 7 – Залежність густини зрошення g від координати x_k горизонтального поперечного перетину факела форсунки й від радіусу факела R відносно осі симетрії його перетину

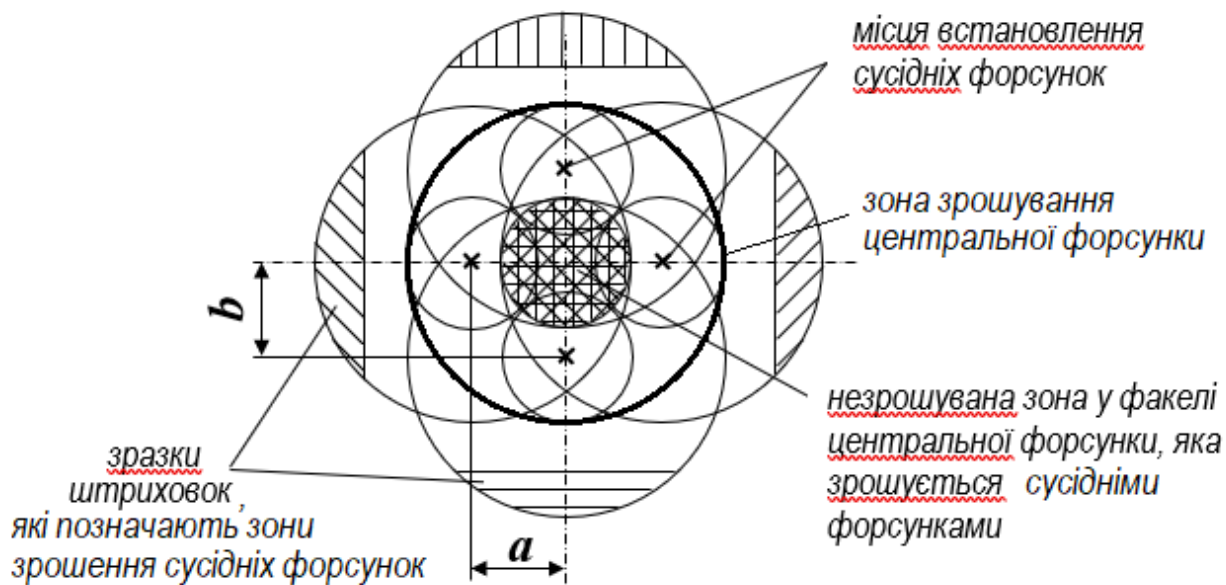


Рисунок 8 – Зони зрошення центральною та сусідніми з нею форсунками за результатами досліджень, проведених у лабораторній роботі:

a, b – відстань між форсунками за довжиною й шириною

Як видно з рис. 8, якщо в центрі факела однієї форсунки є незрошувана зона, то вона може накриватися крапельними потоками, які надходять від сусідніх форсунок. При перетині цих зон зрошування буде забезпечуватися відносно рівномірний розподіл води за зрошувальною поверхнею.

4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ДОСЛІДНИХ ДАНИХ, ЯКІ ОТРИМУЮТЬСЯ В ЛАБОРАТОРНІЙ РОБОТІ

Результати, які отримуються в лабораторній роботі, можуть бути використані при проектуванні контактних апаратів, коли необхідно провести розрахунок розташування форсунок у контактних тепломасообмінних апаратах. Наприклад, у градирні (тобто насадковому теплообміннику) необхідно забезпечити рівномірний розподіл крапельної рідини, яка потрапляє на зрошувач. При цьому не повинно бути незрошуваних ділянок, на яких не буде плівки води, що стікає донизу (через такі ділянки повітря проходить без контакту з водою і, таким чином, охолодження води не відбувається).

Стосовно до камери зрошення центрального кондиціонера, скрубера (й інших безнасадкових контактних апаратів) інформація про розподіл густини зрошення в перетині факела форсунки дозволяє переконатися, що при їх груповому розміщенні відсутні проходи для повітря між крапельними потоками, що продукуються форсунками. У цьому випадку частина повітря не братиме участі в тепловій обробці, а це знизить ефективність роботи контактного апарата.

Питання для самоконтролю

1. Що називається форсункою?
2. Які особливості формування факела відцентрової форсунки ?
3. Що таке видаткова характеристика форсунки, для чого вона використовується?
4. У чому полягає принцип вимірювання об'ємної витрати води ротаметром і ваговим методом.
5. Дати визначення «густини зрошення».
6. Як розподіляється густина зрошення за перетином факела відцентрової форсунки.
7. Для яких цілей використовується інформація про розподіл густини зрошення при конструюванні й реконструкції контактних тепломасообмінних апаратів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пажи Д. Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 256 с.
2. Кутателадзе С. С. Гидродинамика газожидкостных систем / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
3. Дитякин Ю. Ф. Распыливание жидкостей / Ю. Ф. Дитякин, Л. А. Клячко. – М.: Машиностроение, 1977. – 206 с.
4. Головачевский Ю. А. Оросители и форсунки скрубберов химической промышленности / Ю. А. Головачевский. – М.: Машиностроение, 1974. – 271 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Значення густини ρ і коефіцієнта кінематичної в'язкості ν води при різних температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{м}^3/\text{кг}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
0	999,8	1,7905
2	999,9	1,6738
4	1000,0	1,5684
6	999,9	1,4731
8	999,9	1,3867
10	999,7	1,3080
12	999,5	1,2363
14	999,2	1,1708
16	999,0	1,1107
18	998,6	1,0555
20	998,2	1,0040
22	997,8	0,9577
24	997,3	0,9143
26	996,8	0,8741
28	996,2	0,8367
30	995,7	0,8019

Таблиця А.2 – Переведення одиниць вимірювання тиску

	Паскаль (Па, $\text{Н}/\text{м}^2$)	Бар (бар)	Технічна атмосфера (ат, $\text{кгс}/\text{см}^2$)	Міліметр водяного стовпа (мм вод. ст.)	Метр водяного стовпа (м вод. ст.)
1 Па	1 $\text{Н}/\text{м}^2$	10^{-5}	$10,2 \cdot 10^{-6}$	0,102	$1,02 \cdot 10^{-4}$
1 бар	10^5	1	1,02	$1,02 \cdot 10^4$	10,2
1 ат (1 $\text{кгс}/\text{см}^2$)	98066,5	0,981	1	10^4	10
1 мм вод. ст.	9,81	$9,81 \cdot 10^{-5}$	$0,102 \cdot 10^{-3}$	1	10^{-3}
1 м вод. ст.	9806,65	$9,81 \cdot 10^{-2}$	0,102	10^3	1

Таблиця А.3 – Переведення одиниць вимірювання тиску

	кубічний метр 1 м ³	кубічний сантиметр 1 см ³	кубічний міліметр 1 мм ³	мілілітр 1 мл
1 м ³	1	10 ³	10 ⁶	10 ³
1 см ³	10 ⁻³	1	10 ³	1
1 мм ³	10 ⁻⁶	10 ⁻³	1	10 ⁻³
1 мл	10 ⁻³	1	10 ³	1

ПРИМІТКИ

Навчальне видання

ГІДРАВЛІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЦЕНТРОВОЇ ФОРСУНКИ

Методичні вказівки до лабораторної роботи
з курсів «Теплотехнічні процеси та установки промислових підприємств» і
«Кондиціонування повітря»
для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»
усіх форм навчання

Укладачі: ПЕРЕСЬОЛКОВ Олександр Романович
КРУГЛЯКОВА Ольга Володимирівна

Відповідальний за випуск проф. Ганжа А.М.
Роботу до видання рекомендував проф. Ромашов Ю.В.

В авторській редакції

План 2020 р., поз. 94

Підп. до друку 05.06.2020. Формат 60x84 1/16. Папір офсетн. Riso-друк.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 30 прим.
Зам. № 20062501. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ „ХП”
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків-2, вул. Кирпичова, 2

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354
www.modelist.in.ua