

УДК 536.423

І.М. Кузьменко, О.С. Крячок

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РУХУ ПЛІВКИ ВОДИ В СТРУКТУРІ СІТКИ

The effects of netting characteristics, sprinkler construction and irrigation density on the moving water film in the net surface is experimentally studied. Netting surface irrigated by water was supplied through some type of sprinkler without the air flow. The film thickness in the netting is determined empirically using the amount of delayed water. The delayed water was collected by clipping. The percent error of the experiment is up to 6 %. Increasing the irrigation density correspond qualitatively to the thickness of water film according to Nusselt's formula. Using netting with minimal geometric dimensions leads to formation of ultra thin films. The film thickness of spray irrigation is reduced compared with the overflow irrigation. Recommended design of spray nozzle with holes whose diameter corresponds to manufacturability and there is one hole (nozzle) per 50 mm physically irrigated surface. Film movement is a movement in the netting structure and corresponds to fluid flow around cylinder.

### Вступ

Відомо, що інтенсифікувати тепломасообмінні процеси можна збільшуючи швидкості теплоносіїв, зокрема, встановлюючи в потоці пасивні турбулізатори [1]. Саме такий спосіб є прийнятним для турбулізації потоків у контактних апаратах, які використовують у хімічній, нафтопереробній промисловості та кондиціонуванні повітря. Як такі турбулізатори використовують, зокрема, і сітчасті структури.

У [2] вказується, що матеріал стінки та її шорсткість впливають на товщину плівки, а в [3] – навпаки. В [4] зазначають, що нанесення накатки різьби зменшує товщину плівки порівняно з гладкою поверхнею, а в [5] – що зменшується лише середня товщина плівки над виступом, проте її повна товщина зростає. Внаслідок експериментального визначення товщини плівки на сітках методом відсікання [6] встановлено два якісно відмінні режими руху плівки: в структурі сітки та на її поверхні. Для гравітаційно збігаючої плівки, що рухається по вертикальній поверхні з сітчастим покриттям [1], встановлено чотири характерні стадії плівкової течії рідини, залежно від густини зрошення (від повністю затопленого сітчастого покриття до квазірівноваженої течії). Однак у літературі не встановлено вплив зрошувача та структури сітки на гідродинамічні параметри утворюваної плівки.

Робота є важливою для інтенсифікації теплообміну в контактних апаратах і виконувалася в межах науково-дослідної роботи 0111U007842 "Розробка математичних моделей та методів розрахунку процесів в контактних апаратах".

### Постановка задачі

Оскільки гідродинамічні параметри плівки прямо пов'язані з ефективністю тепло- та масообміну в контактних апаратах, метою роботи є експериментальне вивчення гідродинаміки плівки на сітчастих структурах як насадкових поверхнях у контактних плівкових апаратах.

### Методика проведення експерименту

Визначення товщини плівки, що збігає по сітці, проводилося методом відсікання. Схематично стенд показано на рис. 1. Конструкція зрошувача переливного типу створювала стабільну плівку, що контролювалася візуально за відсутністю сухих плям на сітці. На вхід зрошувача (5) через чотири рівномірно розміщені штуцери (4) з внутрішнім діаметром 2 мм пода-

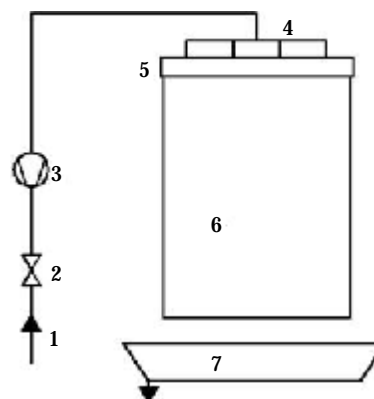
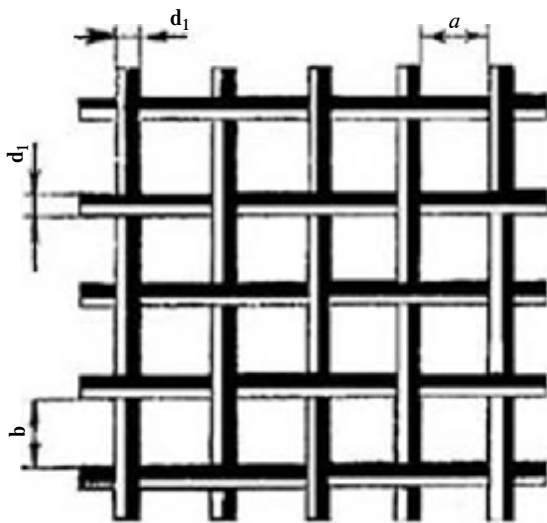


Рис. 1. Схема дослідного стенду для визначення товщини плівки методом відсікання: 1 – подача води; 2 – вентиль; 3 – ротаметр РС-3; 4 – штуцери подачі води; 5 – переливний зрошувач; 6 – сітка; 7 – дренаж

валася вода. Конструкція зрошувача за рахунок гігроскопічного матеріалу, розмішеного всередині, давала змогу вирівняти епюру швидкостей води на виході зі зрошувача. Дослідження проводилися на сітці з розміром вічка  $a = b = 0,35; 0,56; 0,63$  мм (рис. 2). Із сітки вода відводилася в дренаж (7). Перед експериментом досліджувані поверхні очищували та знежирювали. Після монтажу стенд перевірявся на вертикальність сітки та щільність з'єднань. Далі на вертикальному відрізку сітки, розмірами  $H \times B = 115 \times 153$  мм, переливанням створювалася суцільна плівка води. Розміри сітки  $115 \times 153$  мм вимірювалися міліметровою лінійкою, маса су-



а



б

Рис. 2. Дослідна ділянка (а) та структура сітки (б)

хої сітки  $M_s$ , кг – вагами ВЛК-500г/10. Для одержання залежності товщини та швидкості плівки від витрати рідини проведено традиційний експеримент, який включав такі дії:

- Подачу води на зрошення сітки та її стабілізацію. Масова витрата визначалася за показами ротаметра РС-3 із індивідуальним таруванням  $G$ , л/г.

- Вимірювання маси води  $M_\Sigma$ , кг. Синхронно з раптовим від'єднанням зрошення сітки з водою поміщали в мірник, а мірник на ваги ВЛК-500г/10.

- Вимірювання маси мірника після досліду (електронними вагами ВЛК-500г/10 з ціною поділки 0,01 г,  $M_z$ , кг).

- Дискретне збільшення витрати води на зрошення за густини зрошення  $\Gamma = 1,5-17$  г/(м·с).

Дослідження параметрів плівки на сітці проводилося за відсутності газового потоку, оскільки відомо [7], що в плівковому режимі роботи контактних апаратів (до швидкостей газу 2 м/с) дотичною напругою та її впливом на плівку можна нехтувати.

Також проведено серію експериментів на струминному зрошувачі з горизонтального відрізка сталеві труби. Геометрію зрошувача, відстань між зрошувачем і сіткою вибрано на основі дослідів, описаних нижче.

#### Методика обрахунку експериментальних даних та відносні похибки

Обрахунок включав визначення таких параметрів, як:

- густина зрошення сітки, кг/(м·с):

$$\Gamma = G/H,$$

де  $H = 115$  мм – ширина сітки;

- маса плівки води, кг:

$$M = M_\Sigma - M_s - M_z,$$

тобто загальна маса  $M_\Sigma$  без маси сухої сітки  $M_s$  та маси мірника  $M_z$ ;

- середня товщина плівки  $\delta$ , м з формули

$M = f\delta\rho$ , де  $f = HB$  – площа сітки:

$$\delta = \frac{M}{\rho f}.$$

З рівняння  $G = \nu\rho H\delta$  середня швидкість плівки на сітці, м/с становитиме

Таблиця. Ряд експериментальних даних та їх опрацювання

№ п/п	Заміряні параметри				Розраховані параметри			
	Маса мірника, $M_z$ , г	Загальна маса, $M_\Sigma$ , г	Маса сухої сітки, $M_s$ , г	Витрата води, $G$ , кг/год	Густина зрошення, $\Gamma$ , кг/(м·с)	Маса плівки води, $M$ , г	Середня товщина плівки $\delta$ , мм	Середня швидкість плівки, $v_0$ , м/с
1	3,99	21,33	12,48	2,39	0,006625	4,86	0,32	0,0204
2	4,02	19,73	12,48	0,43	0,001184	3,23	0,22	0,0055
3*	4,00	18,97	12,48	0,22	0,000616	2,49	0,17	0,0037

\* у точці 3 з'являються сухі плями – відбувається розрив плівки.

$$v = \frac{G}{\rho H \delta}$$

Ряд експериментальних даних і результати їх опрацювання наведено в таблиці.

Обрахунок відносних похибок вимірювань, що проводився за стандартною методикою [8], вказує, що найвищою є відносна похибка обчислення швидкості плівки. За мінімальних значень  $\Gamma$  вона становить 5,3 %.

### Результати досліджень

У таблиці наведено кілька результатів розрахунку за наведеною методикою для сітки з геометрією  $a/d_1 = 0,50/0,20$  мм, маса мірника змінювалася, оскільки на ньому залишалася волога. Якісно схожі результати отримано на сітках з параметрами 0,63/0,25 та 0,80/0,25.

На рис. 4 показано вплив геометрії сітки та витрати рідини, розрахованої через густину зрошення, на товщину плівки, віднесену до подвоєного периметра сітки (півтовщину плівки). Дослідження виконувалися на сітці з вічком  $a = 0,35; 0,56; 0,63$  мм за переливної конструкції зрошувача. З рис. 4 видно, що в межах похибки експерименту дані для сітки з  $a = 0,56$  та  $0,63$  мм узагальнюються однією прямою та відповідають даним з [9], отриманим при боковому струминному зрошенні сітчастої смуги. При цьому зростання густини зрошення призводить до відповідного збільшення товщини плівки відповідно до формули товщини плівки Нуссельта [10]. На рис. 4 також видно, що на сітці з розміром вічка 0,35 мм відбувається зниження товщини плівки на 20 %, тобто застосування сітчастих матеріалів веде до утворення надтонких плівок. Зокрема, в [1] встановлено, що на поверхні труби, екранованої сіткою, товщина плівки в цьому діапазоні густин зрошення  $\Gamma < 0,18$  кг/(м·с) становить 0,04–0,4 мм. Це відповідає досліджено-

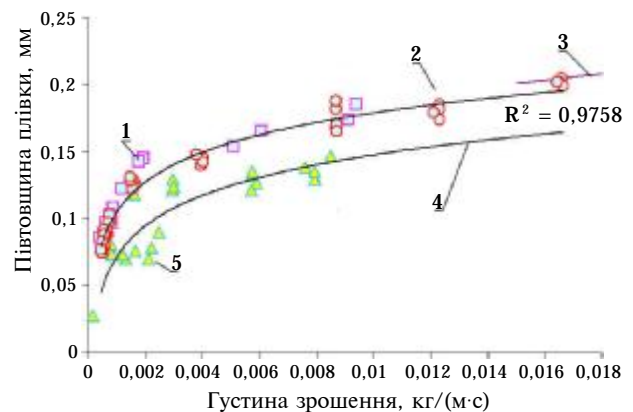


Рис. 4. Залежність середньої товщини плівки від геометрії сітки та густини зрошення для зрошувача переливного типу; 1 –  $a = 0,56$  мм; 2 –  $a = 0,63$  мм; 3 – дані з літератури; 4 – за формулою Нуссельта; 5 –  $a = 0,35$  мм

му випадку, оскільки в роботі наведено півтовщину плівки.

Якщо врахувати, що відповідно до формули Нуссельта швидкість плівки пропорційна квадрату товщини плівки –  $v = 0,33g\delta^2/\nu$ , то зростання товщини плівки в 1,21 разу для сітки з  $a = 0,63$  порівняно з 0,35 мм приведе до зростання середньої швидкості плівки в 1,46 разу. Оскільки коефіцієнт теплообміну від плівки до поверхні газ–плівка води пропорційний швидкості плівки ( $\alpha \approx v$ ), це приведе до 30 % зростання тепловіддачі на межі газ–плівка. Тобто зростання геометрії сітки з 0,35 до 0,63 мм збільшує товщину плівки, її швидкість і тепловіддачу на межі газ–рідина.

З метою встановлення впливу конструкції зрошувача на товщину плівки на сітці подальші дослідження проведено на сітці з вічком 0,63 мм за умови подачі води зрошувачем переливного типу та струменевим зрошувачем. Зрошувач переливного типу показано на рис. 2, а. Струменевий зрошувач являє собою горизонтальну сталеву трубку, діаметром 5 мм з чотирма отворами діаметром 0,6 мм. Відстань між

отворами 30 мм, а між зрошувачем та верхнім краєм сітчастої смуги – 60 мм. Кількість отворів, відстань між ними та відстань між зрошувачем і сітчастою смугою забезпечує оптимальний розподіл рідини. Останнє було встановлено на основі попередніх дослідів, описаних нижче.

Дослідження розподілу води на сітчастій поверхні виконано таким чином. На вертикальну, попередньо змочену сітку через капіляр діаметром 1,2–2,8 мм безпосередньо подавалася вода. Залежно від діаметра капіляра та витрати води, на виході з нього швидкість води становила 0,2–1 м/с. При попаданні на сітку вода перерозподілялася в смугу, показану на рис. 5. При цьому за швидкості 1 м/с на сітці в центрі потоку існував струмінь. У випадку, коли відстань від капіляра до попередньо змоченої сітчастої поверхні перевищувала 60 мм, при потраплянні на попередньо змочену сітку рідина збігала смугою, шириною близько 50 мм, незалежно від діаметра капіляра (очевидно, за рахунок кінетичної енергії струменя). Це дало змогу рекомендувати конструкцію струменевого зрошувача з отворами, діаметр яких відповідає технологічності виготовлення, а один отвір зрошувача припадає на 50 мм фізично зрошуваної поверхні сітки.

На рис. 6 показано вплив конструкції зрошувача та витрати рідини, вираженої через густину зрошення, на півтовщину плівки. З рис. 6 видно, що струминне зрошення сітки призводить до зменшення середньої товщини плівки порівняно зі зрошувачем переливного типу. Зокрема, в діапазоні густин зрошення від 0,002 до 0,017 кг/(м·с), середня товщина плівки за

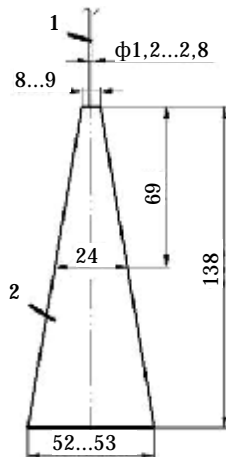


Рис. 5. Розподіл води на сітці: 1 – капіляр, 2 – плівка води

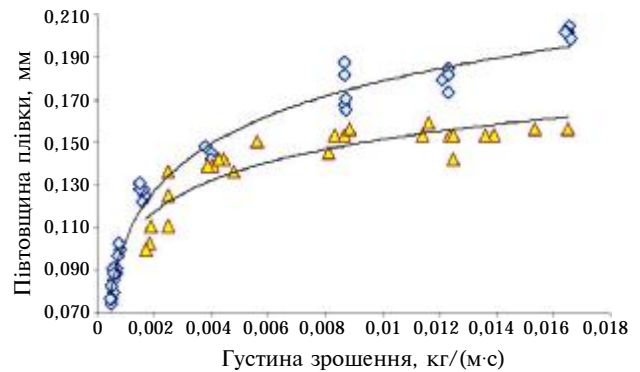


Рис. 6. Вплив конструкції зрошувача на півтовщину плівки на сітці з розміром вічка  $a = 0,63$  мм;  $\diamond$  – струменевий зрошувач,  $\triangle$  – переливний зрошувач

струменевого зрошення зменшується на 8–17 % відповідно. Це можна пояснити нерівномірністю подачі рідини на сітчасту смугу за умови її зрошення струменевим зрошувачем, що, очевидно, веде до утворення локальних потовщень плівки (струменів) та їх прискореного руху сіткою. А оскільки товщина плівки осереднюється, то її значення за нерівномірного зрошення є меншим.

## Висновки

Зростання густини зрошення сітки рідиною приводить до відповідного збільшення товщини плівки рідини відповідно до формули товщини плівки Нуссельта. На сітці з розміром вічка  $a = 0,35$  мм відбувається зниження товщини плівки на 20 % порівняно із сіткою  $a = 0,63$  мм. Це відповідає поверхні труби, екранованої сіткою в цьому діапазоні густин зрошення до 0,18 кг/(м·с), тобто тонкі плівки утворюються на сітчастих структурах, а застосування сітчастих матеріалів з мінімальними геометричними розмірами призводить до утворення надтонких плівок.

У зрошувача з відстанню від капіляра до попередньо змоченої сітчастої поверхні більше 60 мм рідина збігала смугою, шириною близько 50 мм, незалежно від діаметра капіляра (очевидно, за рахунок кінетичної енергії струменя). Це дає змогу рекомендувати конструкцію струменевого зрошувача з отворами, діаметр яких відповідає технологічності виготовлення, а один отвір зрошувача припадає на 50 мм фізично зрошуваної поверхні сітки.

Товщина плівки рідини залежить від конструкції зрошувача. Зокрема, в діапазоні густин

зрошення 0,002–0,017 кг/(м·с), середня товщина плівки на сітці за струменевого зрошення зменшується на 8–17 % порівняно з переливним. Це пояснюється нерівномірністю струменевого зрошення та існуванням струменів на плівці, що фіксувалися візуально.

На основі цих досліджень встановлено, що рух плівки рідини на сітці є рухом потоку в структурі сітки. Останнє відповідає омиванню циліндра потоком рідини, що дає можливість у подальшому розрахувати локальні значення плівки.

1. Туз В.О. Тепломасообмін і гідродинаміка парогазорідних потоків в каналах з сітчастим покриттям: Дис. ... докт. техн. наук. – 05.14.06 – К., 2010. – 268 с.
2. Бояджиев Х., Бешков В. Массоперенос в движущихся пленках жидкости. – М.: Мир, 1988. – 138 с.
3. Лукач Ю.Е., Радченко Л.Б., Тананайко Ю.М. Теплоотдача к тонким жидкостным пленкам, стекающим по полимерной поверхности // Изв. ВУЗов. Химия и хим. технология. – 1972. – XV. – С. 141.
4. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. – М.: Машиностроение, 1990. – 206 с.
5. Харин В.Ф., Николаев Н.А., Николаев А.М. Влияние шероховатости стенки на толщину пленки жидкости при гравитационном стекании // Изв. ВУЗов. Химия и хим. технология. – 1972. – XV, № 9. – С. 1406–1410.
6. Дикий М.О., Туз В.О., Кузьменко І.М. та ін. Гідродинаміка плівки на сітчастій структурі // Пром. тепло-техника. – 2005. – 27, № 4. – С. 23–27.
7. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1966. – 768 с.
8. Кузьменко І.М. Гідродинаміка та тепломасообмін в протитоковому контактному випаровувачі з сітчастою гофрованою насадкою: Дис. ... канд. техн. наук. – 05.14.05. – К., 2003. – 150 с.
9. Дубровская В.В. Гидродинамика и тепломассообмен в смешивающем конденсаторе с сетчатой насадкой: Дисс. ... канд. техн. наук. – 05.14.05. – К., 1999. – 168 с.
10. Василенко С.М., Українець А.І., Олішевський В.В. Основи тепломасообміну. – К.: НУХТ, 2004. – 250 с.

Рекомендована Радою  
теплоенергетичного факультету  
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
3 вересня 2012 року