

# ВПЛИВ ЧАСУ ТА НЕРІВНОМІРНОСТІ ПОДАЧІ РІДИНИ НА МІНІМАЛЬНУ ГУСТИНУ ЗРОШЕННЯ ОБЕРТОВИХ КОНУСІВ ТА ДИСКІВ

І. І. ПУХОВИЙ

## THE IMPACT OF TIME AND IRREGULARITY OF WATER FLOW ON THE MINIMAL DENSITY OF WATERING OF WHEELING CONES AND DISKS

**Анотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований процессов смачивания обертowych конусов та дисків при подачі води на суху поверхню. Досліджена динаміка процесу переміщення лінії розриву плівки (мінімальна густина зрошення) в часі при моментальній подачі заданих витрат води соплом в центр. Швидкість переміщення лінії розриву з часом зменшується, але досягти стаціонарного процесу не вдалося і протягом однієї години. Отримано рівняння для визначення мінімальної густини зрошення. На поверхні диска досліджений вплив нерівномірності подачі води шляхом зміщення сопла від центру на 0...120 мм для диска діаметром 0,2 м. Необхідна витрата води для змочування заданого радіуса диска значно зменшується через посилений динамічний натиск на секторах з більшою витратою води.

**Ключові слова:** мінімальна густина зрошення, суха поверхня, обертові диски та конуси, час, нерівномірне зрошення зміщеним соплом.

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований процессов смачивания вращающихся дисков и конусов при подаче воды на сухую поверхность. Исследована динамика процесса перемещения линии разрыва пленки (минимальная плотность орошения) во времени при моментальной подаче заданных расходов воды соплом в центр. Скорость перемещения линии разрыва со временем снижается, однако достичь стационарного процесса не удалось и в течение часа. Получено уравнение для определения минимальной плотности орошения. На поверхности диска исследовано влияние неравномерности подачи воды путем смещения сопла от центра на 0...120 мм для диска радиусом 0,2 м. Необходимый расход для смачивания заданного радиуса диска сильно уменьшается из-за усиления динамического напора на секторах с большим расходом воды.

**Ключевые слова:** минимальная плотность орошения, сухая поверхность, вращающиеся конусы и диски, неравномерное орошение смещенным соплом.

**Annotation.** The results of the experimental study of moisture treatment of wheeling cones and disks while water was supplied on the dry surface are presented. The dynamic of movement process of the rupture line of the film (the minimum density of watering) in dependence of time while instant water flow with the preselected values were supplied by nozzle in the centre is studied. The velocity of movement of the rupture line decreases with the time but stationary process was not achieved even within one hour. The equation for calculation of the minimum density of the watering is attained. On the surface of the disk the impact of the irregularity of water flow by movement of the nozzle from the centre on 0...120 mm for the disk

with radius 0,2 m. The required flow for watering of the preset disk radius is greatly decreases because of increasing of the dynamic pressure on the sectors with high flow.

**Key words:** minimal density of watering, dry surface, wheeling cones and disks, irregular watering by moved nozzle.

### Вступ

Обертові диски та конуси широко використовуються в різних технологіях для диспергації рідин, їх нагрівання, охолодження, випаровування та масообміну в системах рідина – газ. При диспергації в таких пристроях досягається достатньо однорідний спектр крапель [ 1 ]. В теплових процесах на обертових поверхнях забезпечується інтенсифікація теплообміну і досягаються коефіцієнти тепловіддачі на порядок вищі, ніж в умовах руху гравітаційних плівок [ 2 ]. Обертові поверхні забезпечують надійну роботу при розпиленні невеликих витрат рідини, коли форсунки стають дуже дорогими через необхідність лазерного виконання малого отвору для проходу рідини і високої ймовірності засмічення [ 1 ]. Особливо при проведенні теплових процесів необхідно забезпечити повне змочування поверхонь для попередження відкладень та повного використання поверхні теплообміну плівки рідини з твердою стінкою або з оточуючим її газом, що зв'язано з подачою необхідної кількості рідини і з використанням такого терміну як мінімальна густина зрошення, що є відношенням масової витрати рідини  $m_v$  до периметра поверхні радіусом  $R$ , що змочується.

$$\Gamma_{\min o} = \frac{m_u}{2\pi R}.$$

### Постановка задачі

Відомі роботи щодо змочування обертових дисків як в ізотермічних умовах поверхні і рідини, так і при її випаровуванні [2–4]. Отримані раніше результати основані на експериментальних дослідженнях, що проведені з водою, розчинами гліцерину, поверхневоактивних речовин та солей, на матеріалах дисків з міді, алюмінію, нержавіючої сталі та фторопласту. При проведенні дослідів вимірювався радіус розриву плівки з подачею рідини на суху поверхню ( $\Gamma_{\min o}$ ). Радіус фіксувався після 3...5 хвилин з моменту подачі чи зміни уже встановленої витрати рідини, коли лінія розриву переставала видимо переміщуватися, що було видно при стробоскопічному освітленні. Рідина подавалась в центр диска і при цьому забезпечувалась рівномірною по всій периферії плівка рідини. Вплив часу на переміщення лінії розриву не досліджувався.

В [5] досліджувалась течія та змочування конуса водою, що тече по зовнішній поверхні обертового конуса з кутом при основі  $65^\circ$  і радіусом основи 40 мм, зануреного вершиною в посудину з водою. При цьому немає можливості регулювати витрату рідини без зміни обертів конуса. В згаданій роботі на фото видно висоту, на яку піднімається плівка води, що потім зривається з конуса.

Переміщення лінії розриву плівки при змочуванні конусів від одного радіуса до іншого проходить через поверхню більшої довжини [6], тому помічено, що це переміщення займає суттєвий відрізок часу. У відомій літературі не виявлено досліджень впливу часу на процес змочування. Крім того, в реальних апаратах рідина може подаватися переважно не в центр поверхні, що обертається, а на деякі відстані від центра. Такі дослідження в літературі теж відсутні. Тому в даній роботі поставлена задача дослідити часову динаміку процесів зрошення та вплив нерівномірності подачі рідини на згаданий процес на конусах та дисках.

### Дослідження впливу часу

Враховуючи те, що в теплообмінних апаратах необхідна витрата води встановлюється зразу після запуску апарата, методикою досліджень передбачалась подача різних незмінних в часі витрат води, що вимірювались ротаметром, на суху поверхню конусів і дисків радіусом 0,19 м (повний радіус з системою кріплення 0,2 м), виготовлених зі сталі X18H10T, що попередньо вже оберталася. Швидкість обертання  $\omega$  змінювалась від 20 до 180 1/с. Переміщення лінії розриву, яке ми спостерігали при світлі стробоскопа на конусі, відбувалося протягом часу, що перевищував 10 хвилин з моменту подачі води. Результати досліджень наведені на рис.1. Також використовувалася поступова подача з очікуванням встановлення мало змінного радіуса змочування.

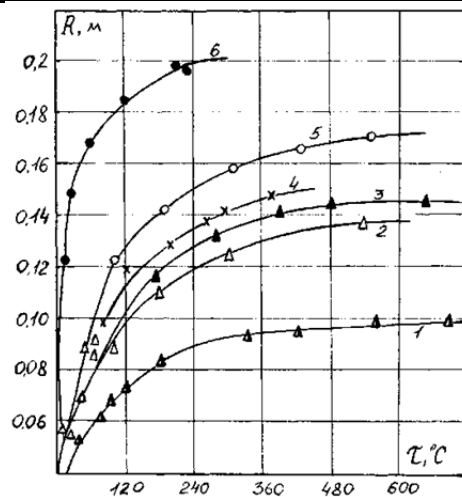


Рис.1. Залежність радіуса змоченої водою ділянки від часу:

конус  $\beta = 55^\circ$ :

1 –  $\omega = 73,2 \text{ c}^{-1}$ ,  $mB = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ ; 2 –  $\omega = 146 \text{ c}^{-1}$ ,  $mB = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ ;

3 –  $\omega = 73,2 \text{ c}^{-1}$ ,  $mB = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ ;

конус  $\beta = 30^\circ$ :

4 –  $\omega = 73,2 \text{ c}^{-1}$ ,  $mB = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ ;

диск  $\beta = 0^\circ$ :

5 –  $\omega = 146 \text{ c}^{-1}$ ,  $mB = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ ; 6 –  $\omega = 146 \text{ c}^{-1}$ ,  $mB = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ .

Потрібно біля 2...5 хвилин, щоб змочений радіус перестав суттєво змінюватися з часом. Як показав експеримент, протягом години продовжується збільшення радіуса змочування і на цьому воно не завершилось. Очевидно тут грають роль капілярні сили чи супутний повітряний потік, що спричиняється обертовим диском. В інтервалі 10...60 хвилин довжина змоченої твірної конуса збільшилася на 12,5% для умов лінії 1 на рис.1. Чекати переміщення лінії розриву більше 5...10 хвилин для відомих випадків застосування подібних апаратів очевидно не має сенсу. Сам факт беззупинного переміщення цікавий для розкриття фізики процесу. Швидкість змочування поверхні найбільш інтенсивно зменшується протягом перших 3...4 хвилини.

Швидкість переміщення лінії розриву при миттєвому встановленні заданої витрати рідини на обертovu поверхню конуса змінюється сильно при зміні витрати (лінії 1 та 3) та швидкості обертання – лінії 1 і 2 (зростає) і з часом зменшується, що видно з рис.1. В першу хвилину середня швидкість змочування на диску досягає 3 мм/с, а для конуса з кутом при основі  $55^\circ$  – біля 1,5 мм/с. На диску швидкість досягнення сталого радіуса розриву більша, ніж на конусі (лінії 5 та 6) через проходження меншого по довжині шляху по радіусу, ніж на конусі. Збільшення радіуса суцільної плівки з часом також зменшує середню товщину плівки на поверхні та на її периферії.

Проведено порівняння змоченого радіуса поверхні залежно від часу для згаданого зрошення з встановленням необхідної витрати в початковий момент подачі рідини і для поступової подачі води до того ж значення витрати, що і в першому випадку. Виявлено, що при поступовому підвищенні витрати з вимірюванням радіуса розриву плівки через 2...3 хвилини після зміни потоку, змочений радіус був завжди більшим і лише через 300...720 секунд результати збігаються, що пояснюється більшим затраченим часом у другому випадку.

На рис. 1 показані дослідження на зовнішніх поверхнях конуса, але і на внутрішній поверхні отримані схожі результати. Відзначимо, при щільностях зрошення, близьких до мінімальних, відривання крапель з зовнішньої поверхні конуса не спостерігалось. При великих витратах за згаданих умов з поверхні плівки відриваються краплі. Для зовнішніх поверхонь існують обмеження як за мінімальною витратою рідини, так і за максимальною. Отже, при визначенні і порівнянні значень мінімальної щільності зрошення різних поверхонь потрібно враховувати час.

Із збільшенням кута при основі конуса змочування погіршується (при однакових  $\omega$  та  $m_e$ ), що можна пояснити більшою, ніж у диска, площею конуса, на якому розташована плівка, бо для підтримання більшої площі плівки потрібна більша енергія. Також зменшується відцентрова сила, що направлена вздовж твірної конуса. Деталі дослідження про різний підхід до швидкості змочування для конуса можна знайти в [6], де також проведено порівняння з аналогічними

характеристиками для диска, що обертається. Отримані результати можуть бути використані в системах автоматичного регулювання при виводі подібних апаратів на режим та можливо в інших цілях, що пов'язані з невеликою затримкою часу включення чи виключення різних приладів без складних часових механізмів та регулюванням характеристик апаратів.

#### Дослідження впливу початкового радіуса зрошування $R_n$ на $\Gamma_{\min o}$

Залежності  $\Gamma_{\min o}$  від  $R_n$  вивчалися лише на дисках, тому що для зовнішньої поверхні конуса при великих кутах конуса при основі подача рідини 1–2 соплами неможлива через відривання потоку від поверхні.

Величина початкового радіуса, на якому розміщувався один патрубок для подачі води  $R_n$  змінювалась в діапазоні  $R_n = 0 \dots 0,12$  м для диска з кінцевим радіусом 0,2 м. Досліджена залежність змоченого радіуса  $R_{zm}$  від витрати води при різних  $R_n$  показана на рис.2 та 3 для різних швидкостей обертання. Видно майже прямолінійну залежність  $R_{zm}$  від  $m_e$  при різних  $R_n$  в дослідженому діапазоні зміни величин. Вплив масової витрати на  $R_{zm}$  зростає сильніше із збільшенням швидкості обертання. Досліди на нержавіючих дисках із сталі

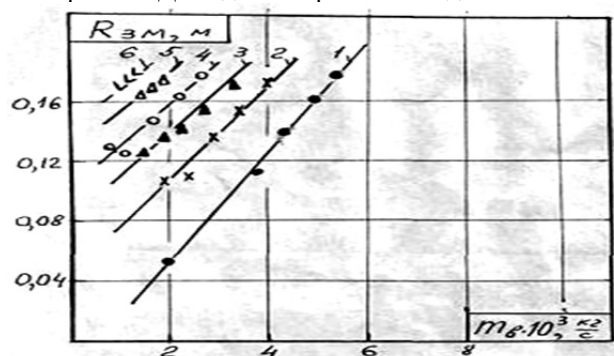


Рис. 2. Залежність радіуса змоченої водою ділянки диска з нержавіючої сталі від масової витрати води з температурою 20°C та початкового радіуса  $R_n$  подачі води одним нерухомим патрубком ( $n = 870$  об/хв):

1 –  $R_n = 0$  (в центр); 2 –  $R_n = 40$ ; 3 –  $R_n = 60$ ; 4 –  $R_n = 80$ ; 5 –  $R_n = 100$ ; 6 – 120 мм

X18N10T нами проведені на воді з температурою біля 20°C при  $\tau > 3$  хвилин. На окремих ділянках (секторах) диска періодично рухається потік з більшою витратою, тому змочування сухого диска поліпшується. При  $R_n = 100$  мм (рис.2) потрібно для повного змочування периферійної поверхні диска лише близько  $2,5 \cdot 10^{-3}$  кг/с, а при  $R_n = 0$  – біля  $6 \cdot 10^{-3}$  кг/с. Це також може бути зв'язаним з площею змоченої поверхні – на підтримання меншої площі потрібно менше енергії. Але коли порівнювати площі диска між радіусами 0,12 та 0,19 м, то отримаємо зменшення площі в 1,6 рази, а витрата (рис.2) змінилася з приблизно 5,5 до 1,5 г/с, тобто зменшилася в 3,66 рази. Таким чином, пропорційність відсутня і можна стверджувати, що більшу роль у змочуванні відіграє динамічний натиск на лінію розриву плівки від підвищеної витрати рідини, що рухається по криволінійній спіралі, де є товща плівки через зміщення сопла від центру обертання.

Кут нахилу ліній  $R = f(m_e)$  або  $m_e = f(R)$  залежить від  $\omega$ . В зоні малих радіусів і витрат залежність може бути нелінійною через малу величину відцентрового прискорення  $\omega^2 R$  та впливу сили тяжіння і вхідної ділянки на диску. Із збільшенням швидкості обертання для повного змочування потрібна менша витрата води (для викладених результатів, коли швидкість обертання відрізнялась в 2 рази, необхідна витрата для радіуса 0,12 м при менших обертах збільшується в 2,5 рази).

Детальні дослідження мінімальної щільності зрошення [2–4] показали, що вплив різних параметрів на  $\Gamma_{\min o}$  є складним і описується емпіричними рівняннями, справедливими для окремих діапазонів радіусів та швидкостей обертання на металевих поверхнях (для  $\Gamma_{\min o}$  характерна залежність від кута змочування рідиною твердої поверхні, який за вимірюваннями автора складав для нержавіючої сталі і алюмінію відповідно 59° та 61°, а за літературними даними 74° та 71°).

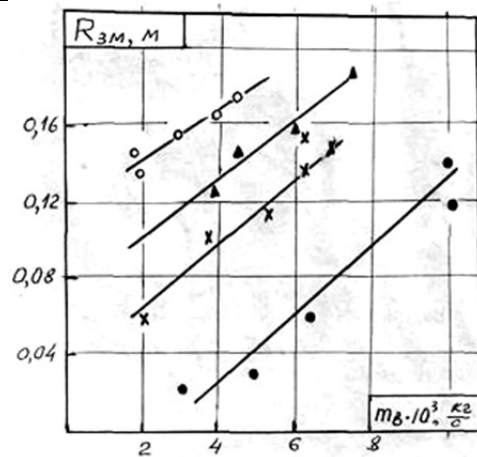


Рис. 3. Залежність радіуса змоченої водою ділянки диска з нержавіючої сталі від витрати води з температурою 20°C та початкового радіуса  $R_n$  подачі води (швидкість обертання диска  $n=400$  об/хв). Нумерація ліній йде знизу вверх.  
 $1 - R_n = 0$  (в центр);  $2 - R_n = 40$ ;  $3 - R_n = 80$ ;  $4 - R_n = 120$  мм

Наші дослідження проведені на тому самому диску із нержавіючої сталі, що і в [2–4]. Результати дослідження змочування конусів та дисків при подачі рідини в центр можна описати для поверхонь радіусом більшим 0,075 м з алюмінію та нержавіючої сталі емпіричним рівнянням з урахуванням досліджень [2]:

$$\Gamma_{\min.o} = 927 \cdot \mu^{0.46} \cdot \sigma^{2.2} \cdot \omega^{-0.48} \cdot R^{0.65} (\cos\beta)^{-0.65},$$

де  $\mu$  – динамічна в'язкість, Па·с;  
 $\sigma$  – поверхневий натяг, Н/м;  
 $\omega$  – кутова швидкість обертання, 1/с;  
 $\beta$  – кут при основі конуса, градуси.

Порівнюючи отримані експериментальні результати з теоретичним розв'язанням задачі про мінімальну густину зрошення [2], відзначимо, що вплив окремих фізичних величин якісно збігається з теорією, а кількісно дещо відрізняється. Теоретично також не передбачається збільшення мінімальної густини зрошення при зростанні радіуса (фактично виявлено [4], що залежність  $\Gamma_{\min.o}$  від радіуса має мінімум). Потрібні додаткові дослідження для узагальнення дослідних результатів.

### Висновки

1. Вплив часу на переміщення лінії розриву плівки особливо проявляється на обертових конусах.
2. Середня швидкість переміщення лінії розриву найбільша в першу хвилину після подачі рідини і досягає 6 мм/с для диска та біля 3 мм/с для конуса.
3. Зміщення подачі рідини одним патрубком на деякі відстані від центра значно покращує змочування дисків і зменшує мінімальну густину зрошення сухої поверхні з заданим радіусом.
4. Вперше досліджено змочування зовнішньої поверхні конуса і отримана емпірична залежність для розрахунку мінімальної щільності зрошення з урахуванням кута при основі конуса, при збільшенні якого мінімальна шільність зрошення зростає.

### Література

1. Посохин В.Н., Софиуллин Р.Г. // Перспективные конструкции увлажнителей воздуха на основе пористых вращающихся распылителей. Журнал АВОК. – 2005. – № 3, С.21–23.
2. Пуховой И.И. Исследование минимальной плотности орошения и теплоотдачи при парообразовании в пленке жидкости на вращающемся диске // Автореф. дис. канд. техн. наук. – К. – 1973. 26 с.
3. Бутузов А.И., Пуховой И.И., Риферт В.Г. Экспериментальное исследование минимальной плотности орошения в центробежном тонкопленочном аппарате // Киев.: Наук.думка. Теплофизика и теплотехника. – 1973. – вып. 24. – С.18–22.
4. Бутузов А.И., Пуховой И.И. О влиянии скорости вращения и размера вращающейся поверхности на смачиваемость ее пленкой жидкости // Вестник Киевского политехнического института. Сер. Теплоэнергетика Изд. КГУ. – 1973. – №10. – С.14–17.

5. Takahiro Aochi, Naona Sato, Naoto Koban and Toshihiro Hon // Liquid Film Flow Rising the outer Surface of the Rotating Cone,-Trans. ASME.- Ser. B.- 2010.-№ 76.- p.161-163.
  6. Пуховой И.И., Янчук Б.М. Закревская Л.Ф. Исследование смачивания поверхностей вращающихся конусов изотермической пленкой жидкости // Реферативная информация о научно – исследовательских работах в вузах Украинской ССР. Энергетика. – 1978. – вып. 12. – С.28-29.
- 
- 
- 
-