

УДК 532.529

В.В. ДУБРОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, **О.М. ПІДВИСОЦЬКИЙ**, канд. техн. наук, **А.І. БАШТОВИЙ**, канд. техн. наук (Інститут загальної енергетики НАН України, Київ)

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ГРАДИРНІ ЗА РАХУНОК РЕГУЛЮВАННЯ РІВНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ РОЗПИЛЕНИХ КРАПЕЛЬ ЗА ПЛОЩЕЮ ЗРОШУВАННЯ

Досліджено зони крапельного зрошування, які утворюються при розпилу рідини відцентровими форсунками. Показано вплив різних факторів на формування зон зрошування як одиничними форсунками, так і блоками – двома форсунками, факели розпилу яких спрямовані назустріч один одному.

Ефективність роботи випаровувальних градирень, в яких рідина та газова фази рухаються у протилежних напрямках, залежить не лише від параметрів циркуляційної технологічної рідини (витрати і температури), а й від стану навколишнього повітряного середовища. При цьому важливу роль у процесі випаровувального охолодження відіграють швидкість висхідного потоку повітря та її розподіл у просторі градирні. Не менш важливо у градирнях, які базуються на взаємодії зустрічних потоків води і працюють без внутрішньо-баштових зрошувачів, рівномірно розподілити падаючий полідисперсний ансамбль крапель за площею градирні. Рівномірний розподіл крапель в об'ємі градирні сприяє покращанню внутрішньої аеродинаміки градирні, тим самим інтенсифікуючи теплообмінні процеси [1].

У зв'язку з цим було проведено експериментальні дослідження деяких характеристик розподілу крапель за площею зрошування, а також впливу різних факторів на формування зон зрошування при розпилюванні рідини з відцентрових форсунок. За своєї специфіки (порожнечистий конусоподібний факел розпилу) відцентрова форсунка зрошує поверхню у вигляді кільцеподібної зони. На відміну від струменової форсунки, в якій максимальний питомий потік рідини досягається на осі факела, а при збільшенні відстані від осі він монотонно зменшується, у відцентровій форсунки питомий потік на осі майже відсутній, і по мірі віддалення від неї спочатку збільшується, а потім, досягнувши максимуму, зменшується [2].

На рис. 1 схематично показано кільцеві зони зрошування K , які утворюються при витіканні рідини з одиничної відцентрової форсунки 1 (а) та при взаємодії зустрічних потоків води з двох форсунок 1 і 2 (б). Форсунки розташовані одна над одною вздовж вертикальної

осі. У випадку (б), коли використовується технологія диспергування рідини на зустрічних потоках, як показали проведені нами експерименти, зона зрошування помітно більша, ніж у одиничної форсунки.

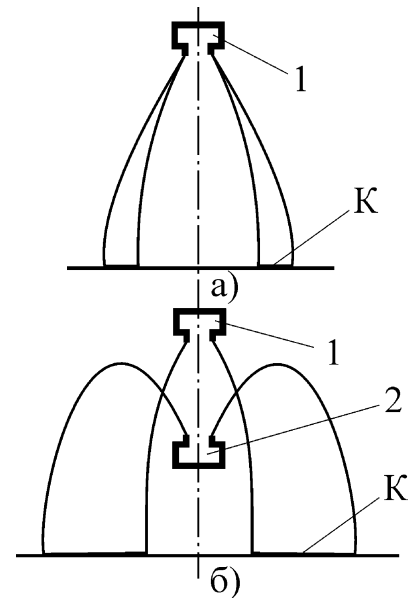


Рис. 1

При витіканні рідини з відцентрової форсунки після руйнування конусоподібної півки факела розпилу краплі, які утворюються, розлітаються по обидві сторони самої півки, утворюючи так званий кут розльоту крапель. Цей кут і визначає ширину кільцеподібної зони зрошування. На рис. 2 для одиничної форсунки 1 показано формування кута α_p розльоту крапель при подрібненні півки. Зауважимо, що при дослідженні форсунок, як і відзначається в літературі [2], було підтверджено, що в середині кута розльоту крапель (також як і на середині зони зрошування) кількість розпиленої рідини значно більша, ніж на периферії кута. Кут β_m між вертикальною віссю і нижньою границею кута роз-

льоту визначає "мертву" зону, вільну від крапель. У процесі експериментів вивчалися кути розльоту крапель, кути мертвих зон, а також щільності потоків розпиленних крапель у залежності від геометричних характеристик розпилювальних форсунок та гідродинамічних режимів витікання.

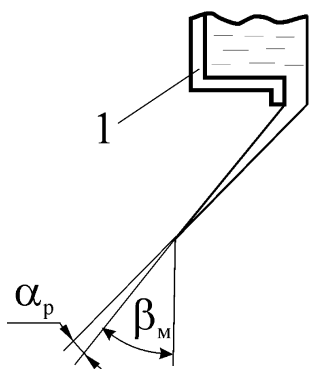


Рис. 2

Для визначення вказаних параметрів розподілу крапель використовувався аналізатор дисперсного складу власної розробки [3], принцип роботи якого базується на лічильно-імпульсному методі вимірювань. У потоці крапель проводили вимірювання частоти замикань торців голок-електродів датчика аналізатора розпиленими краплями при відомий відстані між електродами. При цьому відстань між голками в процесі вимірювання змінювалась покроково. Датчик аналізатора розташовувався на такій відстані від форсунок, де завершувалось повне руйнування конусоподібних плівок, і потік розпиленої рідини складався тільки з крапель. Розподіл крапель у просторі визначався шляхом сканування зон розльоту з проведенням вимірювань частоти замикань електродів у різних точках зони. Вважали, що щільність потоку крапель пропорційна частоті замикань голок-електродів аналізатора. Границі кута розльоту визначалися в досліді аналізатором за частотою замикань, яка практично дорівнювала нулю, що свідчило вже про відсутність крапель у зоні вимірювання. В досліді використовувались форсунки з діаметром камери закручування $D_k = 50$ і 100 мм, різними діаметрами d_c та довжинами L_c сопел. Варіювалась також від $2,5$ до 20 мм величина підтиску h – ширина вхідного потоку в камеру закручування.

Ширина кільця зрошування під форсункою і відповідна площа мертвої зони під нею залежить від низки факторів. Насамперед, це кут φ

розкриття факелу розпилу. Фактори, які впливають на кут розкриття факелу [4], є також визначальними і для знаходження кутів розльоту крапель і мертвих зон. На рис. 3 як приклад наведено деякі дослідні дані для $D_k = 100$ мм, довгого сопла ($L_c/d_c = 0,75$), та робочого тиску $P = 0,4$ атм ($\bullet - h = 2,5$ мм, $\circ - h = 20$ мм). Із збільшенням d_c кут розльоту крапель збільшується. Збільшення площі вхідного потоку призводить до зростання α_p . На малих діаметрах сопел ($D_k/d_c = 5$) кути розльоту були практично однакові як для довгого ($L_c/d_c = 0,75$), так і для короткого ($L_c/d_c = 0,15$) сопел. З ростом d_c (до $D_k/d_c = 2,22$) коротке сопло при інших рівних умовах давало більший кут розльоту.

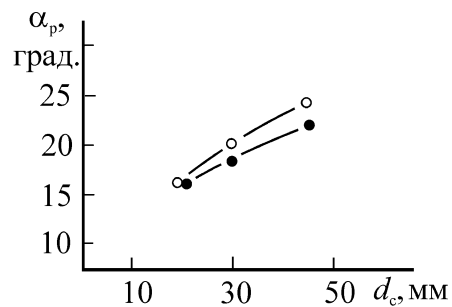


Рис. 3

На ширину кільця зрошування та кругову мертво зону під форсункою впливає також швидкість витікання рідини з сопла. Зі збільшенням швидкості внутрішній радіус кільця зрошування збільшувався.

На кругову рівномірність розподілу рідини відносно осі факела розпилу впливає ексцентриситет між осями сопла та камери закручування. Але більш істотним є вплив числа вхідних каналів у камеру [2]. Наявність лише одного вхідного каналу призводить до суттєвого зміщення кільця зрошування відносно осі форсунки.

Для забезпечення кращої рівномірності розподілу крапель по площі зрошування треба мінімізувати зони, вільні від крапель. Рис. 4 показує вплив діаметра сопла на зону, вільну від крапель ($D_k = 100$ мм; $P = 0,4$ атм; $\bullet - L_c/d_c = 0,75$, $h = 2,5$ мм; $\circ - L_c/d_c = 0,75$, $h = 20$ мм; $+ - L_c/d_c = 0,15$, $h = 2,5$ мм; $\Delta - L_c/d_c = 0,15$, $h = 20$ мм). Кут β_m збільшувався із збільшенням d_c . Коротке сопло призводило до більших розмірів мертвої зони. Зі зменшенням площі вхідного потоку ($h = 2,5$ мм) кут β_m збільшувався. Зміна робочого тиску (і, природно, витрати рідини) майже не впливала на зону, вільну від крапель.

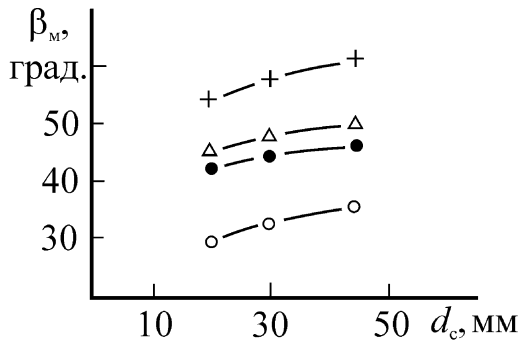


Рис. 4

В експериментах з блоками двох форсунок із зустрічними потоками води використовувалися форсунки з діаметром камери закручування $D_k = 50$ мм. Роботи проводилися як із двома ідентичними форсунками (верхня 1 та нижня 2, рис. 5), так і з форсунками, які відрізнялися одна від одної геометричними розмірами. При цьому кути розкриття для верхньої та нижньої форсунок були різними.

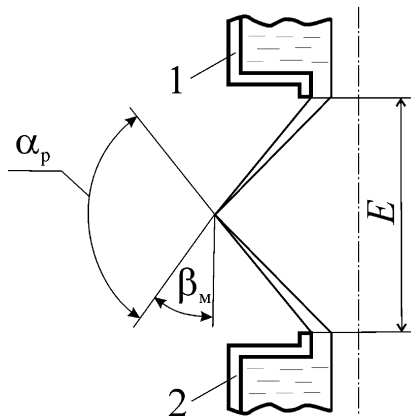


Рис. 5

Нагадаємо, що за отриманими дослідними даними [5] було встановлено, що найбільш інтенсивне диспергування рідини і створення дрібнодисперсної хмари крапель відбувається у випадку, коли зустрічні конусоподібні факели розпилу взаємодіють плівками, а не краплями, коли плівки вже зруйновані. Тому в експериментах відстань E між форсунками встановлювалася такою, за якої забезпечувалася взаємодія факелів розпилу тільки плівками: як суцільними – на малих відстанях між соплами, так і плівками з розривами-кавернами – на більших. Залежно від того, яка відстань E встановлювалася між зрізами сопел форсунок, взаємодія двох потоків відбувалася плівками різної товщини.

Максимальна відстань E_m між зрізами сопел форсунок у блоці, що гарантує взаємодію плівками, визначається залежностями

$$E_m = 2l \cos(\varphi/2) \quad (1)$$

для однакових форсунок та

$$E_m = l_1 \cos(\varphi_1/2) + l_2 \cos(\varphi_2/2) \quad (2)$$

для різних форсунок. Тут l – та ж сама довжина плівки, що не розпалася, факела розпилу для однакових форсунок; l_1 та l_2 – довжини плівок для різних форсунок; φ , φ_1 та φ_2 – кути розкриття факела розпилу для однакових та різних форсунок. Для довжин плівок, що не розпалися, та кутів розкриття факелів розпилу авторами отримані відповідні безрозмірні залежності.

Для того, щоб розмістити форсунки в блоці на такій відстані E_r , яка гарантує взаємодію двох факелів розпилу плівками, треба виконати умову $E_r < E_m$.

Рис. 6 і рис. 7 ілюструють кути розльоту крапель, кути мертвих зон і розподіл щільностей потоків розпиленних крапель у блоці при взаємодії двох зустрічних потоків для однакових та різних форсунок, при однаковій відстані між форсунками $E = 60$ мм. Геометричні характеристики форсунок були: для однакових форсунок: $d_c = 17,5$ мм, $h = 10$ мм, $L_c = 10,5$ мм; для різних форсунок: верхня – $d_c = 12,5$ мм, $h = 15$ мм, $L_c = 12,5$ мм; нижня форсунка – $d_c = 25$ мм, $h = 5$ мм, $L_c = 5$ мм. Точки на діаграмах розпилу відповідають точкам розміщення голок-електродів датчика аналізатора і характе-

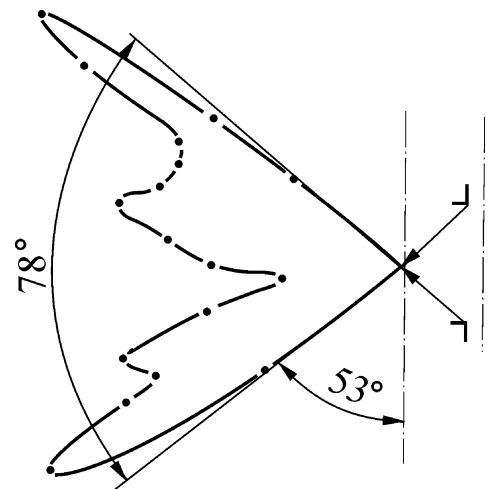


Рис. 6

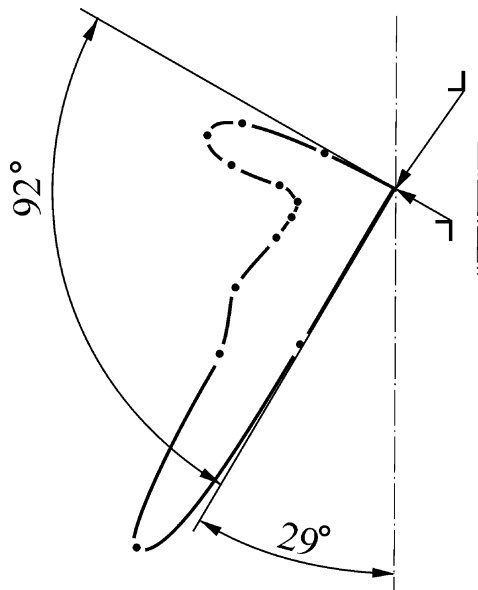


Рис. 7

ризують щільність потоку в цих точках. Основна кількість рідини розпилюється вздовж твірних конусоподібних факелів. У ідентичних форсунок (рис. 6) діаграма розподілу близька до симетричної по відношенню до кута розльоту, в той час як у різних форсунок (рис. 7) щільності потоків суттєво різні: був помітний несиметричний розподіл кількості розпиленої рідини за кутом розльоту крапель. Для наведеного приклада у блока форсунок із різною геометрією (і різними кутами розкриття факелу) кут розльоту збільшився з 78° до 92° порівняно з блоком однакових форсунок. Кут мертвої зони у блока різних форсунок зменшився з 53° до 29° . Але зменшення чи збільшення кута мертвої зони залежить від того, з якими кутами розкриття факелу розпилу розміщено форсунки зверху і знизу блока. Досліди показали, що зі збільшенням відстані між форсунками кут розльоту крапель у всіх випадках збільшувався. Збільшення тиску і, природно, швидкості витікання рідини з форсунки призводить до незначного зменшення кута розльоту, при цьому кут мертвої зони може незначно зрости.

Внаслідок обробки експериментальних даних було отримано узагальнюючі залежності для кута α_p розльоту крапель при взаємодії двох потоків і кута β_m мертвої зони, вільної від крапель:

$$\alpha_p = -8,4 \cdot 10^{-4} E^2 + 0,35 E + 44 + 16 \left(\frac{d_c^B}{d_c^M} \right), \quad (3)$$

$$\beta_m = 5,7 \cdot 10^{-4} E^2 - 0,21 E + 90 - 26 \left(\frac{d_c^B}{d_c^M} \right), \quad (4)$$

де d_c^B та d_c^M – відповідно більший та менший діаметри сопел форсунок. Кут α_p та β_m визначаються в градусах. Досліди проводилися при відношенні d_c^B/d_c^M від 1 до 2. Відстань E між форсунками в досліді була в діапазоні від 60 до 170 мм, що обумовлено взаємодією потоків плівками, що не розпалися, довжина яких пов'язана з геометричними розмірами використаних в експериментах форсунок.

За допомогою формул (1) – (4) можна розташовувати форсунки в блоці на необхідній відстані одна від одної та передбачати характеристики розподілу крапель у просторі градири за геометричними параметрами форсунок та режимом витікання рідини при взаємодії зустрічних потоків.

Для оцінки впливу нерівномірності зрошування по площі градири були виконані числові дослідження за моделлю [6]. Був розглянутий випадок, коли вся поверхня градири зрошувалася краплями рівномірно та випадок, коли зрошувалося тільки 50% її поверхні за інших рівних умов. Так, для п'яти фракцій крапель з середніми розмірами $\delta_i = 1,4; 1,7; 2; 2,4; 2,8$ мм за початкової температури води 40°C та температури повітря 24°C ступінь охолодження води у випадку нерівномірного зрошування був приблизно на 15% гіршим, ніж при рівномірному зрошуванні.

В результаті проведених досліджень можна зробити такі висновки.

Забезпечення рівномірності розподілу розпилюваних крапель за площею зрошування призводить до підвищення ефективності теплообмінних процесів у градири.

При використанні в градирих відцентрових форсунок як розпилювальних пристроїв можна регулювати розміри площ кільцеподібних зон зрошування, а також зон, вільних від крапель, базуючись на необхідних геометричних розмірах форсунок та режимах витікання рідини з них.

Використання технології зустрічних потоків при диспергуванні охолоджуваної рідини призводить до суттєвого збільшення площі зрошування порівняно з двома одиничними форсунками.

Варіюючи геометричними розмірами форсунок, використовуючи у блоках пари однакових або

різних форсунок, а також розміщуючи різні форсунки відповідним чином відносно одна одної, можна регулювати не лише розміри площ зон зрошування і мертвих зон (оптимізуючи тим самим рівномірність розподілу крапель по об'єму градирні), а й щільність потоків розпилених крапель.

1. Власов А.В., Дашков Г.В., Солодухин А.Д., Фисенко С.П. Исследование внутренней аэродинамики башенной испарительной градирни // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т. 75. – № 5. – С. 64-68.
2. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин В.И. Распыливание жидкостей. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
3. Дубровский В.В., Подвысоцкий А.М., Баштовой А.И. Определение дисперсного состава капель при распыливании жидкости из центробежной форсунки // Технологія і техніка друкарства. – 2004. – Вып. 2-3. С. 94-99.
4. Дубровский В.В., Подвысоцкий А.М. Экспериментальное исследование процесса истечения жидкости из центробежных форсунок, предназначенных для градирен // Проблемы загалної енергетики. – 2001. – № 5. – С. 45-48.
5. Dubrovskyy V. V., Podvysotskiyy A. M., and Bashtovyy A. I. The effect of geometrical and hydrodynamic parameters of centrifugal atomizers on the disperse composition of a drop ensemble for different modes of liquid atomization // Proc. of the 11th Workshop on two-phase flow predictions, Merseburg, April 5-8, 2005.
6. Шрайбер А.А., Баштовой А.И. Математическое моделирование тепломасообменных процессов в градирнях нового поколения // Пром. теплотехника. – Т. 27. – № 5(2005). – С. 28-33.