

УДК 621.175.3

Б.О. Блюсс, С.В. Дзюба

Придніпровський науковий центр НАН України і МОН України

О.В. Жевжик, І.Ю. Потапчук

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

DOI: 10.15421/372101

РІВНОМІРНІСТЬ РОЗПОДІЛУ РІДИНИ В РОЗПИЛЮВАЛЬНИХ ГРАДИРНЯХ З ПЛІВКОВИМИ ВІДЦЕНТРОВИМИ РОЗПИЛЮВАЧАМИ

Одним з важливих технічних завдань при проектуванні розпилювальних градирень є створення водорозподільника та розташування на ньому розпилювачів, які забезпечують потрібну рівномірність розподілу води по перерізу. У багатьох випадках досягнення рівномірного або заданого розподілу води по перерізу градирень є запорукою ефективної охолоджуючої спроможності та визначає ступінь досконалості конструкції.

В розпилювальних вентиляторних градирнях відхилення локальної щільності зрошення від середньої приводить до нерівномірного розподілу повітря і, як наслідок, погіршення охолодження води. Розподіл рідини залежить від способу зрошення. Значного поширення набуло зрошення за допомогою відцентрових розпилювачів плівкового типу. В цих розпилювачах краплинний потік утворюється після подрібнення тонкої плівки рідини, що витікає із сопла. Факел розпиленої рідини має порожнину в середині і суттєво нерівномірне розподілення по радіусу. Зменшення нерівномірності досягається вибором відстані між розпилювачами і схеми їх розташування.

Для градирень з плівковими розпилювачами з відомою дисперсністю краплинного потоку можливий чисельний розрахунок коефіцієнту нерівномірності. Для розв'язання цієї задачі побудована математична модель руху краплин води у полідисперсному факелі, які продуваються зустрічним повітрям.

Після чисельного розв'язку рівнянь математичної моделі визначається коефіцієнт нерівномірності площі зрошення та його залежність від відстані між розпилювачами.

Відповідно до розрахунку, в градирні з розпилювачами з кутом факелу 130° , початковою швидкістю краплин 4 м/с та об'ємно-поверхневим діаметром краплин 2 мм забезпечується нормативний коефіцієнт нерівномірності при відстані між розпилювачами не більше 0,8 м.

Ключові слова: розпилювальна градирня, краплини води, рівняння руху, чисельне моделювання, нерівномірність розподілу води.

One of the important technical tasks in the design of spray cooling towers is the creation of a water distributor and the location of sprays, which provide the desired uniformity of water distribution in cross section, on it. In many cases, achieving a uniform or specified distribution of water in the cross section of the cooling tower is the key to effective cooling capacity and determines the degree of perfection of the design.

In spray fan coolers, the deviation of the local irrigation density from the average leads to uneven air distribution and, as a consequence, the deterioration of water-cooling. The distribution of the liquid depends on the method of irrigation. Irrigation with film-type centrifugal sprays has become widespread. In these sprays, the drip flow has formed after grinding a thin film of liquid, which run out from the nozzle. The torch of the sprayed liquid has a cavity in the middle and essentially uneven distribution on radius. Reduction of non-uniformity has reached by a choice of distance between sprayers and the scheme of their arrangement.

For cooling towers with film sprays with known droplet flow dispersion, numerical calculation of the non-uniformity coefficient is possible. To solve this problem, a mathematical model of the motion of water droplets in a polydisperse torch blown by counter-air have built.

After numerical solution of the equations of the mathematical model, the coefficient of non-uniformity of the irrigation area and its dependence on the distance between the sprayers is determined.

According to the calculation, in the cooling tower with sprayers with a torch angle of 130° , the initial velocity of the droplets of 4 m/s and the droplets volume-surface diameter of 2 mm provides the normative coefficient of non-uniformity at a distance between nozzles of 0,8 m.

Keywords: spray cooling tower, water droplets, equation of motion, numerical simulation, uneven water distribution.

Вступ. Рівномірне розподілення рідини по поверхні зрошення - необхідна умова досягнення задовільних показників тепло- і масообміну в розпилювальних апаратах, а нерівномірне розподілення рідини і газу є причиною зниження їх ефективності [1].

В розпилювальних вентиляторних градирнях відхилення локальної щільності зрошення від середньої приводить до нерівномірного розподілу повітря і, як наслідок, погіршення охолодження води.

Розподіл рідини залежить від способу зрошення. Значного поширення набуло зрошення за допомогою розпилювачів відцентрового типу, які утворюють нерівномірний розподіл рідини по радіусу факела.

Зменшення нерівномірності досягнуто в відцентрових розпилювачах з заповненим факелом конструкції [2], в яких за рахунок стікання по радіальним щілинам загальмованого біля стінки закрученого потоку

заповнюється газовий вихор по осі камери розпилювача.

Зменшення нерівномірності в розпилювальній градирні досягається також вибором відстані між розпилювачами і геометричною схемою їх розташування. Дослідження гідродинаміки закрученого потоку дозволили створити розпилювачі з об'ємно-поверхневим діаметром краплин $d_{32}=1,8...2,2$ мм при тиску $0,02...0,04$ МПа [3]. В цих розпилювачах краплинний потік утворюється після подрібнення тонкої плівки рідини, що витікає із сопла. Факел рідини має порожнину в середині і суттєво нерівномірне розподілення по радіусу.

Постановка задачі. Відхилення від рівномірності оцінюється коефіцієнтом нерівномірності [4]

$$\eta = \int_F \frac{|q - q_{cp}|}{q_{cp}}, \quad (1)$$

де q – щільність зрошення в елементарній площі, q_{cp} – середня щільність по поверхні F .

Метод визначення коефіцієнту нерівномірності [4] потребує експериментального дослідження розподілу рідини по радіусу факела розпилювача. Коефіцієнт η визначають розділивши площу зрошення на клітини, а щільність зрошення в клітині – підсумовуванням кількості рідини від всіх розпилювачів із зоною факела, що попадає в клітину.

Для градирень з плівковими розпилювачами з відомою дисперсністю краплинного потоку можливий чисельний розрахунок коефіцієнту нерівномірності.

Для факелу, що утворюється з тонкої плівки (рис. 1.а), всі краплини мають однакову початкову швидкість V_0 і кут вильоту α_{ϕ} , які відповідають швидкості і куту плівки на час подрібнення, при цьому приймаємо, що краплини рухаються з точкового джерела на осі факелу без зіткнень під дією сили ваги та аеродинамічного опору.

В проекціях на осі координат система рівнянь руху краплини має вигляд

$$\frac{dV_r}{d\tau} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{C_{\psi}}{d} \cdot \frac{\rho_r}{\rho} \cdot (V_r - U_r) \cdot |\vec{V} - \vec{U}|;$$

$$\frac{dV_z}{d\tau} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{C\psi}{d} \cdot \frac{\rho_r}{\rho} \cdot (V_z - U_z) \cdot |\vec{V} - \vec{U}| + g; \quad (2)$$

$$\frac{dr}{d\tau} = V_r; \quad \frac{dz}{d\tau} = V_z.$$

В цих рівняннях $\vec{V} = \{V_r, V_z\}$, $\vec{U} = \{0, U_z\}$ – вектори швидкості краплини і газу в градирні; ρ_r , ρ – щільність газу і розпиленої води; d – діаметр краплин; τ – час; $g=9,81$ м/с².

Коефіцієнт аеродинамічного опору краплини [5]

$$C = \frac{24}{Re} + \frac{4,4}{\sqrt{Re}} + 0,32,$$

при числах Рейнольдса $Re = \frac{\rho_r d |\vec{V} - \vec{U}|}{\mu_r}$ в діапазоні $10^{-3} \leq Re \leq 6 \cdot 10^3$, μ_r –

динамічна в'язкість газу.

Коефіцієнт форми ψ враховує зміну аеродинамічного опору краплини внаслідок деформації [6]

$$\psi = \exp(0,03 \cdot We^{1,5}),$$

де $We = \frac{\rho_r d |\vec{V} - \vec{U}|^2}{\sigma}$ – число Вебера, σ – поверхневий натяг рідини.

Інтегральну функцію розподілу об'єму краплин по діаметру приймали відповідно [7]

$$v = \frac{2\alpha^4}{3\pi} \int_{d_{\min}}^{\infty} d^3 K_1(\alpha d) dd, \quad (3)$$

де $K_1(\alpha d)$ – функція Бесселя, $\alpha = 3\pi/(4d_{32})$.

Початкові умови для інтегрування системи рівнянь є відома початкова швидкість краплини $V_{r0} = V_0 \sin(\alpha_\phi/2)$, $V_{z0} = V_0 \cos(\alpha_\phi/2)$ і координати $r=0$, $z=0$. Інтегрування системи (2) здійснювали на ЕОМ методом Рунге-Кутти четвертого порядку точності.

За мінімальний діаметр краплин в факелі приймали діаметр, якому відповідає значення функції розподілення $\upsilon(d_{\min})=0,1$, а за максимальний – $\upsilon(d_{\max})=0,95$. Мініальному d_{\min} і максимальному d_{\max} діаметру краплинного потоку відповідає менший R_{\min} і більший R_{\max} радіуси кільця розподілу рідини, які розраховуються за рівняннями руху (2).

Розділивши факел рідини на кільця r_i, r_{i+1} ($i=1..n, d_1=d_{\min}, d_n=d_{\max}$) чисельним інтегруванням системи рівнянь (2), за допомогою ітерацій, знаходили діаметри краплин d_i, d_{i+1} , що мають дальність польоту r_i, r_{i+1} . Об'єм рідини, що потрапляє в кільце r_i, r_{i+1}

$$\upsilon_i = \frac{2\alpha^4}{3\pi} \int_{d_i}^{d_{i+1}} d^3 K_1(\alpha d) dd, \quad (4)$$

Щільність зрошення кільця r_i, r_{i+1} , віднесена до загальної витрати рідини

$$q_i = \frac{\upsilon_i}{\pi(r_{i+1}^2 - r_i^2)}. \quad (5)$$

Для визначення коефіцієнту нерівномірності в градирні, переріз на вибраній висоті розділяли на клітини сіткою з кроком $\Delta x, \Delta y$ (рис. 1.б). Кожну клітину розділяли на смуги з радіусами r_i, r_{i+1} , знаходили їх площу S_i і відповідні діаметри краплин d_{i+1}, d_i .

Кількість рідини, яка потрапляє в клітину від одного розпилювача

$$Q_k = \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{\pi(r_{i+1}^2 - r_i^2)} \upsilon_i, \quad (6)$$

де N – кількість смуг.

Щільність зрошення в клітині

$$q_j = \frac{1}{\Delta x \Delta y} \sum_{k=1}^K Q_k, \quad (7)$$

де K – кількість розпилювачів, рідина від яких потрапляє в клітину.

Коефіцієнт нерівномірності щільності зрошення

$$\eta = \frac{1}{q_{cp}} \sum_{j=1}^{N_k} |q_j - q_{cp}|, \quad (8)$$

де N_k – кількість клітин, q_{cp} – середня щільність зрошення.

Результати розрахунків. Розрахунки розподілу рідини по поверхні зрошення проведені для розпилювача градирень з $\alpha_{\phi}=130^{\circ}$, $V_0=4$ м/с, $d_{32}=2$ мм, $\rho=1000$ кг/м³, $\sigma=0,073$ Н/м, $\rho_r=1,29$ кг/м³, $\mu_r=1,81 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $U_z=1$ м/с.

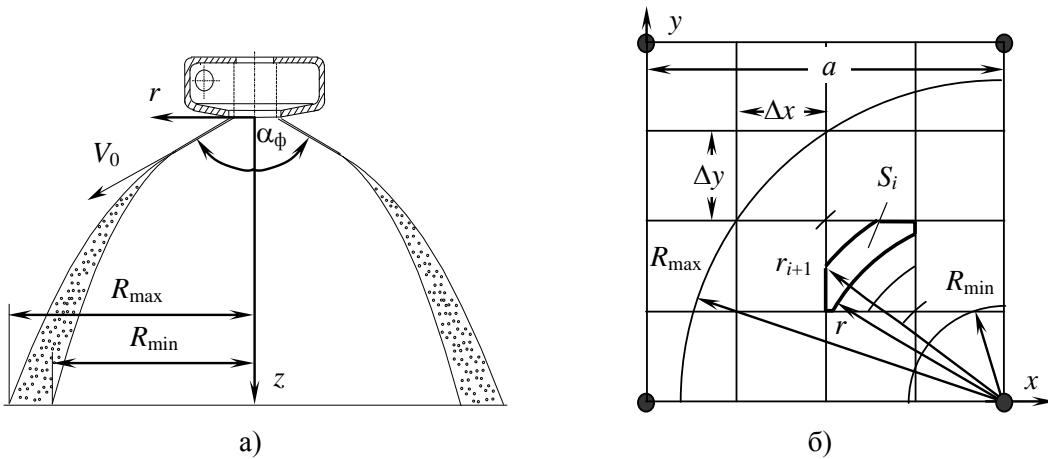


Рис. 1 – Схема до розрахунку нерівномірності розподілу води:
а) відцентровий плівковий розпилювач; б) розпилювальна градирня

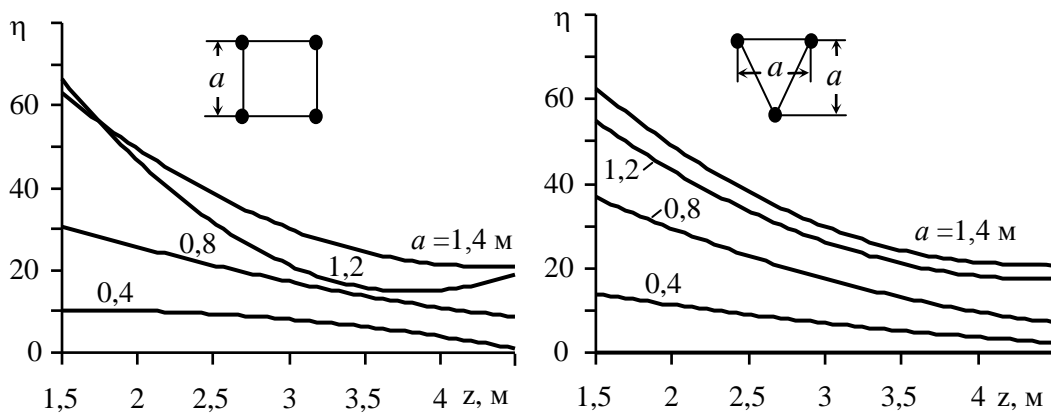


Рис. 2 – Коефіцієнт нерівномірності

На рис. 2 приведена залежність η від відстані до розпилювачів розташованих за квадратною і трикутною схемою з кроком $a=0,4\dots 1,4$ м. Із графіків видно, що коефіцієнт нерівномірності зменшується із збільшенням z . Для відстані від розпилювачів $z>3$ м коефіцієнт η залишається на рівні $0,05\dots 0,15$ в залежності від відстані між розпилювачами. Для квадратної схеми розташування розпилювачів при $a\geq 1,2$ м і $z<2,5$ м характерні більші η в порівнянні з трикутним розташуванням. При $a<1,2$ м і $z>2,5$ м квадратна і трикутна схеми мають близькі коефіцієнти нерівномірності.

Висновки. Нормативному для градирень коефіцієнту нерівномірності $\eta<0,25\dots 0,3$ задовольняє відстань між розпилювачами $a\leq 0,8$ м.

Метод чисельного розрахунку дозволяє вибрати для відцентрового плівкового розпилювача конструктивну схему розподільника рідини.

Бібліографічні посилання

1. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1981. -812 с.

2. Чернышов А.А. А.с. 589030 СССР, В 05 В 1/06, Форсуночный ороситель / А.А. Чернышов, В.А. Мизин, И.М. Ханин (СССР). - №2388698/23-23; Заявлено 22.07.76; Опубл. 25.01.78, Бюл. №3. -24с.

3. Коваль В.П. Гидроаэродинамическое совершенствование безоросительной градири / В.П. Коваль, А.В. Жевжик // Системні технології. Дослідження динаміки і оптимізація параметрів технологічних процесів: Збір. наук. праць. -Вип.2. - Дніпропетровськ: "Системні технології", 1998. -с.23-39.

4. Технические указания по расчету и проектированию башенных градирен для тепловых электростанций и промышленных предприятий. Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1971. -100 с.

5. Олевский В.А. Сборник научно-исследовательских работ Научно-исследовательского и проектного института механической обработки полезных ископаемых, -1953, -№8, -С. 7-43.

6. Раушенбах Б.В. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б.В. Раушенбах, С.А. Белый, И.В. Беляев, В.Я. Бородачев, М.С. Волынский, А.Г. Прудников. – М.: Машиностроение, 1964, -257 с.

7. Братуга Э.Г. Диагностика капельных потоков при внешних воздействиях. Х.: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. -144с.

Надійшла до редколегії 12.05.2021