

УДК 621.175

Е. Г. БРАТУТА, д-р техн. наук, професор

О. В. КРУГЛЯКОВА, канд. техн. наук, доцент

В. В. Чубарова, молодш. наук. співроб.

Я. В. Бондаренко, магістр

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

**ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГРАДИРНІ БРИЗКАЛЬНОГО ТИПУ З  
УРАХУВАННЯМ ПОВЕРХНІ КРАПЕЛЬ РОЗПИЛЕНОЇ ВОДИ**

*В статті приведена математическа модель процесу охолодження циркуляційної води в градирні бризкального типу, побудована з урахуванням реальної поверхності диспергованої жидкості. Дано сравнение результатів расчёта с даними натурального експеримента.*

*В статті приведена математична модель процесу охолодження циркуляційної води в градирні бризкального типу, яка побудована з урахуванням реальної поверхні диспергованої рідини. Дається порівняння результатів розрахунку з даними натурального експерименту.*

**Постановка та актуальність проблеми**

Як було показано в наших роботах [1, 2], ефективність охолодження циркуляційної води в градирнях суттєво впливає на енергетичні характеристики усіх об'єктів енергогенеруючого та енергоспоживчого профілю, коли виникає потреба в охолодженні циркуляційної води. Одним з перспективних напрямків у вирішенні вказаної задачі є реконструкція існуючих, в більшості випадків, застарілих плівкових градирень (ПГ) та крапельних (КГ) в градирні бризкального типу (БГ), які відрізняються простотою конструкції, надійністю в експлуатації, невеликими витратами на проведення ремонту і стабільністю охолоджувального ефекту.

У той же час, результати натурних випробувань БГ показують, що міра охолодження циркуляційної води в них (за інших рівних умов) є нижчою, ніж в ПГ і КГ.

У зв'язку з цим для реалізації в БГ того ж охолоджувального ефекту, що і в ПГ і КГ щільність зрошування, що рекомендується при роботі, наприклад, вентиляторних градирень, повинна співвідноситися таким чином [3]: ПГ-8-12 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>г); КГ-6-8 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>г); БГ-5-6 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>г).

Так як при реконструкції ПГ і КГ в градирні бризкального типу необхідно зберегти ту ж витрату охолоджуваної води, то очевидно, що необхідна ступінь охолодження в БГ може бути забезпечена як за рахунок використання ефективніших засобів диспергування води, так і за рахунок раціональнішого їх розміщення в робочому об'ємі градирні.

Відомо, що і відпрацювання ефективних розбризкувачів, і перевірка різних технічних рішень, що стосуються зрошувальної системи градирні, у традиційній постановці вирішується суто експериментально, що пов'язане як з великими матеріальними витратами, так і значними витратами часу. Тому коротший і менш дорогий шлях до вирішення поставленого завдання полягає у відповідному поєднанні методів фізичного експерименту і математичного моделювання.

Не зважаючи на те що перші роботи які стосуються застосування БГ [4, 5] і початку теорії тепло-масообміну між повітрям та розпиленою рідиною [6] відносяться до тридцятих-сорокових років, до теперішнього часу методика розрахунків охолодження циркуляційної води майже повністю заснована на емпіричних співвідношеннях, правомірність яких фактично обмежена умовами проведення експерименту. Протягом тривалого часу сама ідея застосування БГ була спірною.

Певний інтерес, в плані вдосконалення методики розрахунку БГ, представляють роботи [7, 8], в яких зроблена спроба врахувати в емпіричних рівняннях, що описують теплообмін і гідравлічний опір градирні, дисперсний склад крапель. Однак і в цих випадках рекомендації.

для розрахунку обмежені приватними умовами промислових і напівпромислових випробувань.

Деяким компромісом між емпіричними і теоретичними методами розрахунку є робота [8], в якій використані "числа випарування" в якості основного визначального фактора, що дозволило (при незмінному дисперсному складі крапель, що мав місце в БГ) запропонувати методику розрахунку охолодження циркуляційної води.

Аналіз опублікованих результатів дослідження БГ дозволяє зробити висновок, що основною причиною обмеженості існуючих методів розрахунку є не лише суто емпіричний їх характер, але в основному те, що в цих методах розрахунку не знаходить віддзеркалення вплив реальної величини міжфазної поверхні, яка визначається дисперсним складом крапель.

### Основна частина

Відмінною рисою запропонованої нами математичної моделі розрахунку процесу охолодження циркуляційної води в БГ, є використання реальної функції розподілу крапель за розмірами у факелі розпиленої рідини.

В якості зазначеної функції використовується рівняння виду

$$V(D) = \frac{2}{3\pi} \bar{\alpha}^4 D^3 K_1(\alpha D), \quad (1)$$

в якому єдиним параметром, визначеним з експерименту на основі лічильно-імпульсного методу [9], є величина параметру розподілу  $\bar{\alpha}$ .

Безперервна функція (1) розбивається на N інтервалів і для кожного i-того інтервалу записується наступна система рівнянь:

рівняння руху одиничної краплі в потоці повітря

$$m \frac{d\vec{V}_k}{d\tau} = \pm m \vec{g} - C_D \Psi_{(D)} \rho_B f_k \frac{|\vec{U}_k| \vec{U}_k}{2}, \quad (2)$$

де  $C_D$  – коефіцієнт аеродинамічного опору краплі у виді [10]

$$C_D = \frac{24}{Re_k} + 0,248 \left(1 + \frac{194}{Re_k}\right)^{0,5} + 0,248, \quad (3)$$

де  $\Psi_{(D)}$  – коефіцієнт, який враховує деформацію краплі, приймається, як рекомендований у [11]:

$$\Psi_{(D)} = \exp(0,03We)^{1,5}. \quad (4)$$

Рівняння тепло-масообміну для рідинної компоненти дисперсного потоку

$$m C_P \frac{dt_p}{d\tau} = f[\alpha(t_p - t_{II}) + \beta r(\omega_p - \omega_{II})], \quad (5)$$

рівняння балансу енергії повітря уздовж лінії струму пароповітряної суміші.

$$M_{II} C_{PII} \frac{dt_{II}}{d\tau} = C_P M_P \frac{dt_p}{d\tau} - i_{II} M_{II} \frac{dd'}{d\tau}, \quad (6)$$

рівняння нерозривності потоку повітря.

$$\frac{dV}{d\tau} = V_{II} F . \quad (7)$$

У разі баштової градирні висотою  $H$  ця система рівнянь доповнюється рівнянням природної тяги повітря:

$$H_D(\rho_{II1} - \rho_{II2}) = \xi \frac{V_{II}^2}{2} \bar{\rho}_{II}, \quad (8)$$

$$\text{де } \bar{\rho}_{II} = 0,5(\rho_{II1} + \rho_{II2}).$$

Аеродинамічний опір бризкальної градирні  $P_{a.o.}$ :

$$P_{a.o.} = \sum_{j=1}^{i=6} P_j , \quad (9)$$

де  $P_j$ , аеродинамічний опір  $i$ -того елемента градирні

$$P_j = \xi_j \frac{\rho_{II} V_B^2}{2}. \quad (10)$$

Рівняння (1)–(10) доповнюються співвідношенням для визначення критерію  $Nu = \alpha D / \lambda$  у вигляді, що рекомендується в роботі [10]:

$$Nu = 2 + (0,04 Re_k^{0,5} + 0,06 Re_k^{\frac{2}{3}}) Pr_r^{0,4}, \quad (11)$$

$$\text{де } Nu = 2 + (0,04 Re^{0,5} + 0,06 Re^{\frac{2}{3}}) Pr^{0,4};$$

$Pr_r$  – критерій Прантля.

Коефіцієнт масовіддачі  $\beta$  визначається, виходячи з подібності процесів тепло масообміну, за формулою

$$\frac{\alpha}{\beta C_{вл}} = 1, \quad (12)$$

де теплоємність вологого повітря приймається, як:

$$C_{рп} = 1,0056 + 1,9693 d . \quad (13)$$

Для тієї частини рідини, яка випадає на стінки градирні у вигляді плівки використовується рівняння:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}, \quad (14)$$

запропоноване в роботі [7].

На підставі узагальнення результатів експериментального дослідження [9] дисперсного складу крапель у факелі розпилювачів, які використовуються у зрошувальній системі градирні, було отримано залежність виду:

$$\bar{\alpha} = 0,24 \Delta P^{0,25}, \quad (15)$$

де  $\bar{\alpha}$  – параметр розподілу функції (1),

$\Delta P$  – перепад тиску на розпилювачі.

Рівняння (15), а також залежності для куту розкриття факелу і характеристики видатності форсунки ударного типу (якими обладнана зрошувальна система градирні) були використані у залежній системі рівнянь математичної моделі.

Для встановлення ефективності математичної моделі були використані результати експериментального дослідження бризкальної градирні, схема якої показана на рис.1

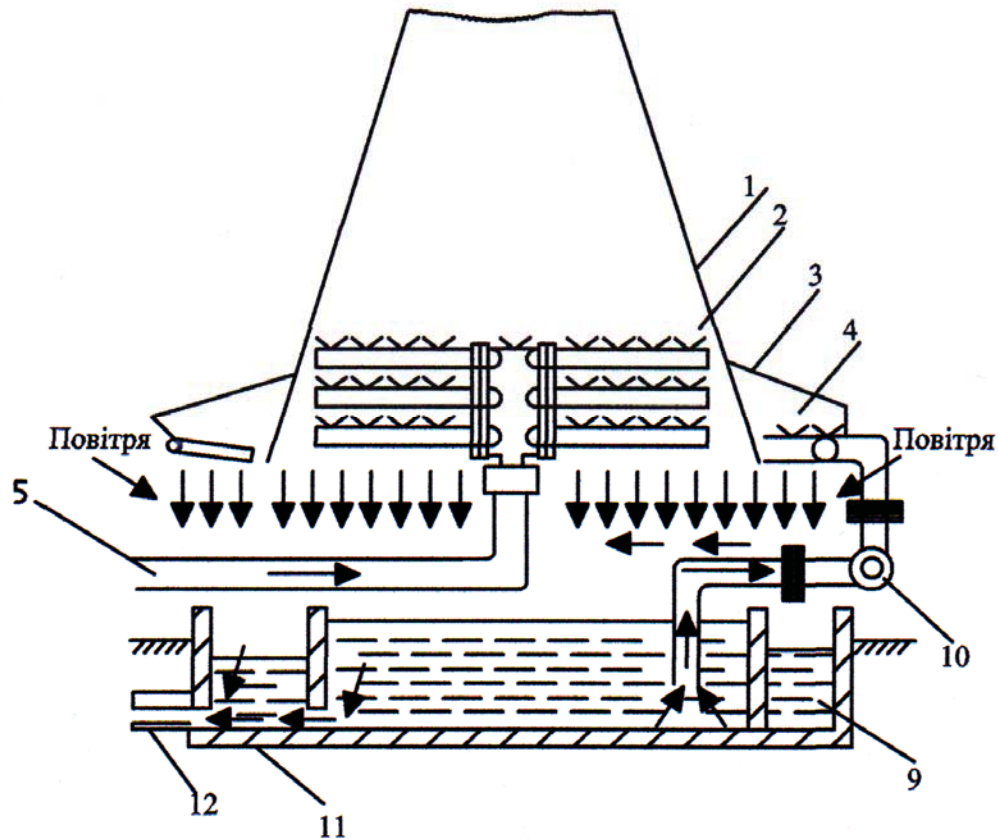


Рис.1. Схема бризкальної градирні:

1 – витяжна вежа; 2 – проти течі на область; 3 – кільцевий тамбур; 4 – поперечно-точна область; 5 – трубопровід гарячої води; 6 – водозбірний басейн; 7 – трубопровід водопостачання; 8 – роздільна перегородка між водозбірними басейнами; 9 – водозбірний басейн поперечно точної області; 10 – насосний блок; 11 – відведення води з басейну протivotочної області; 12 – загальне скидання води з градирні

При числовій реалізації математичної моделі режимно-геометричні характеристики градирні, а також параметри води на вході охолоджувача, параметри повітря і витрати взаємодіючих середовищ приймалися відповідно умовам проведеного експерименту в роботі [12].

Весь обсяг експериментального матеріалу був представлений у вигляді відношення  $\frac{\Delta t}{\Delta P}$  в функції  $\Delta P$ , що відображало відносну ступінь охолодження води, що припадає на одиницю напору перед розбризкувачем. Ці дані наведені на рис. 2. Тут крапками нанесені результати експерименту, суцільні криві отримані в результаті чисельної реалізації математичної моделі.

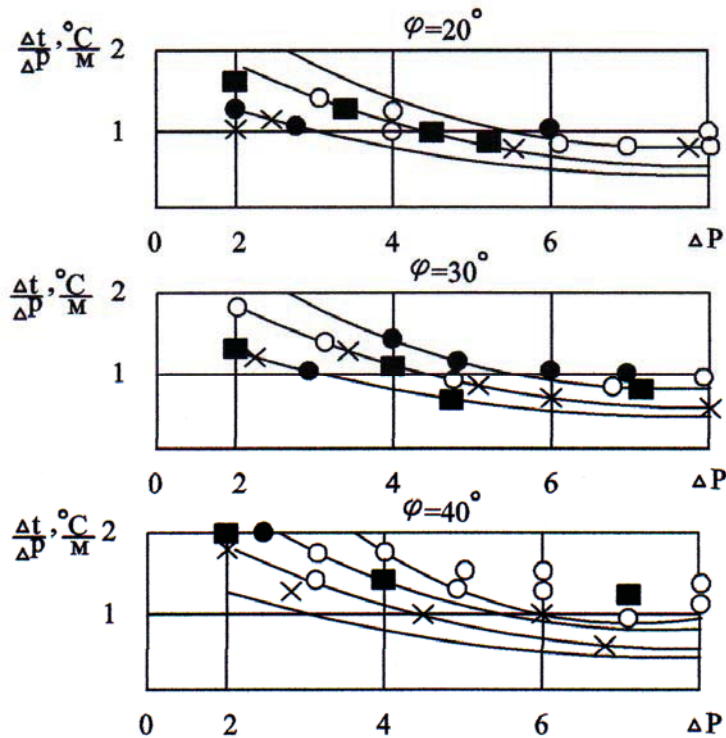


Рис. 2. Залежність відносного ступеню охолодження  $\Delta t/\Delta P$  в функції  $\Delta P$  при різних кутах розкриття факелу  $\varphi$  і діаметрах сопла форсунки  $d_\phi$ .

1 - ●●● – сопло  $d_\phi$  10 мм    2 - ○○ – сопло  $d_\phi$  15 мм  
 3 - ■■■ – сопло  $d_\phi$  20 мм    4 - ×× – сопло  $d_\phi$  25 мм

Результати, які показані на рис. 2 по-перше, підтверджують гарне узгодження розрахункових (суспільні лінії) і експериментальних (точки) даних. По-друге, отримане нова проста форма узагальнення експериментальних результатів, яка показує доцільну межу підвищення напору води перед форсунками. Так, для розглянутого варіанту градири з рис. 2 видно, що ця межа лежать в інтервалі  $0,08 \leq \Delta P \leq 0,1$  МПа.

#### Прийнятті позначення:

$V$  – швидкість;  $\tau$  – час;  $\rho$  – щільність;  $t$  – температура;  $f$  – поверхня;  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну;  $\beta$  – коефіцієнт масообміну;  $r$  – теплота пароутворення;  $\omega$  – концентрація;  $C_p$  – ізобарна теплоємність;  $i$  – ентальпія;  $M$  – маса;  $d$  – вологоємність;  $\xi$  – коефіцієнт аеродинамічного опору;  $P$  – тиск;  $m$  – маса краплі;  $D$  – діаметр краплі;  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Nu$  – критерії Ренольдса, Прандтля, Нуссельта;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності.

#### Висновки

В роботі запропонована адекватна математична модель процесу охолодження циркуляційної води в градири бризкального типу, що дозволяє встановлювати її ефективність вже на рівні передпроектний розробок в залежності від майже усіх режимно-геометричних характеристик об'єкту.

Запропонована нова форма узагальнення результатів експериментального випробування градири у вигляді відносного ступеню охолодження води, що дозволяє встановлювати доцільні діапазони напору води перед розбризкувачем.

#### Список літератури

1. Братута Э. Г. Влияние температуры охлаждения воды на эффективность холодильной установки/ Э. Г. Братута, И. В. Смородская// Интегрированные технологии и энергосбережения. – 2000. – № 2. – С. 3–6.

2000. – № 2. – С. 3–6.

2. Братута Э. Г. Влияние температуры охлаждения воды на теплотехнические характеристики при компремировании газов в холодильной технике. / Э. Г. Братута, В. Г. Шерстюк // Інтегровані технології і енергозбереження. – 2006. – № 2. – С. 84–88.

3. Гладков В. А. Вентиляторные градирни/ В. А. Гладков, Ю. И. Арефьев, В. С. Пономаренко //– М.:Стройиздат, 1976, – 216 с.

4. Giebel C. // Verein deutscher Ingenieure – 1921. V. 242. – P. 1–98.

5. Merkel F. // V.D.I. Zeitschrift. – 1926. – № 4. – P. 123.

6. Simpson W. M., Sherwood T. K. // Refrigerating Engineering. – 1946. – December. – V. 52. – P. 50–58.

7. Берман Д. Д. Испарительные охлаждения циркуляционной воды / Д. Д. Берман. – М., 1957. – 320 с.

8. Морозов В. А. Охлаждение воды в градирнях брызгального типа / В. А. Морозов, В. В. Гончаров // Изв. ВНИИТ им. Б. Е. Веденеева. – 1970. – Т. 92. – С. 274–288.

9. Братута Э. Г. Диагностика капельных потоков при внешних воздействиях/ Э. Г. Братута. – Харьков: – Вища школа, 1987. – 144 с.

10. Терехов В. И. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокотельных потоках / В. И. Терехов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 284 с.

11. Раушенбах Б. В. Физические основы рабочего процесса в камерах воздушно-реактивных двигателей/ В. Б. Раушенбах, С. А. Белый, И. В. Беслецов и др. // Изд-во «Машиностроение», М.:1964. – 526 с.

12. Гельфанд Р. Е. Метод теплового расчета брызгальных установок с использованием числа испарения / Р. Е. Гельфанд // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. –1980.

## **DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF THE SPRAY TYPE COOLING TOWER ON THE BASIS OF THE AREA OF SPRAYED WATER DROPS**

E. G. BRATUTA, Doctor of Engineering, Professor

O. V. KRUGLIAKOVA, Candidate of Engineering, Associate Professor

V. V. CHUBAROVA, Junior Research Fellow

Y. V. BONDARENKO, Master

*The article contains the mathematical model of circulating water cooling in the spray type cooling tower created on the basis of the actual area of dispersed liquid. Results of calculations are compared with real experimental data.*

Поступила в редакцию 15.03.2013г.