

УДК 532.529

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

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ОХОЛОДЖЕННЯ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ВОДИ У БРИЗКАЛЬНИХ ГРАДИРНЯХ

Проведено експериментальне дослідження дисперсного складу крапель, що утворюються при взаємодії двох зустрічно спрямованих факелів розпилю. Розроблено узагальнену математичну модель охолодження циркуляційної води в градирні та знайдено його оптимальні умови.

Ступінь охолодження циркуляційної води на теплових і атомних електростанціях має значний вплив на процес конденсації відпрацьованої пари, отже, і на ККД енергоблоків. Серед пристроїв, що використовуються для охолодження води, напевно, найбільш поширеними є градирні різної конструкції, включаючи баштові бризкальні градирні, в яких рідина розпилюється на краплі.

Одним із шляхів підвищення інтенсивності тепломасообмінних процесів у градирнях є використання нового пристрою для розпилювання рідини відцентровими форсунками [1]. Принцип його роботи базується на організації взаємодії зустрічних конусоподібних потоків розпиленої води, що призводить до значного покращання її диспергування та інтенсифікації тепломасообмінних процесів. Градирні, обладнані такими розпилювачами, не потребують будь-яких внутрішньобаштових конструкцій – плівкових або крапельних зрошувачів, охолоджувальних вентиляторів – і працюють за невисокого тиску циркуляційної води. Ці конструкції дозволяють істотно знизити матеріалоємність градирень та енергоспоживання при їх експлуатації.

Розміри крапель у традиційних бризкальних градирнях досягають 4-5 мм і більше. Зниження діаметрів крапель до 2-3 мм і менше дозволить різко підвищити ефективність теплообміну, що, як показано у [2], перевершує характеристики плівкових градирень. З точки зору досягнення найбільш розвинутої поверхні теплообміну, природно, слід прагнути до отримання найбільш дрібних крапель. Але в градирнях дрібні краплі досить інтенсивно випаровуються, а також виносяться висхідним повітряним потоком, що накладає певні обмеження на фракційний склад ансамблю крапель. Отже, досягнення оптимальних розмірів крапель безпосередньо при розпилюванні є ключовим моментом оптимізації процесу охолодження води в градирні.

Раніше в Інституті загальної енергетики НАН України було проведено ретельні експериментальні дослідження закономірностей розпилювання води одиночними відцентровими форсун-

ками. Зокрема, було визначено основні геометричні характеристики факела розпилю (довжину плівки, кут розкриття факела та товщину кільцеподібного потоку рідини на виході з сопла) [3] та фракційний склад ансамблю крапель залежно від геометричних характеристик форсунки і режиму витікання [4]. Крім того, було побудовано математичну модель руху, охолодження і випаровування води в градирні стосовно до випадку, коли всі краплі після розпилювання рухаються вниз [5]. Мета цієї роботи полягала у вивченні фракційного складу крапель при розпилюванні води блоком відцентрових форсунок – двома форсунками із зустрічно спрямованими факелами, узагальненні моделі [5] з урахуванням можливості руху певної частини крапель після розпилювання вгору, а також визначенні оптимального режиму охолодження води.

Експериментальні дослідження дисперсного складу крапель

Вивчення процесів розпилювання води з блоків форсунок проводилось на експериментальному стенді циркуляційного типу (рис. 1).

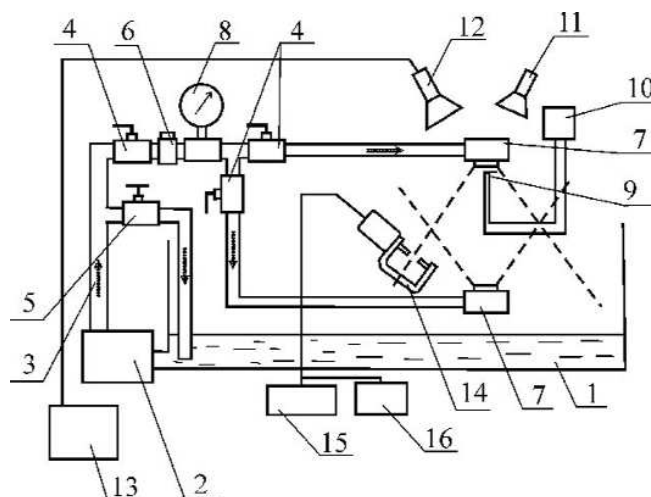


Рис. 1

Піддон 1 заповнювався водою, об'єму якої достатньо для забезпечення необхідної робочої продуктивності форсунок. Вода з піддона за допомогою відцентрового електронасоса 2 (WILO

МНІ 14-230-90) нагніталася в напірну магістраль 3, звідки потік води розділявся за двома напрямками. По першому через вентиль 5 вода поверталася в піддон 1, і таким чином здійснювалася циркуляція води в першому замкненому контурі. По другому напрямку вода через шарові крани 4 і лічильник 6 (МТК – У) поступала у відцентрові форсунки 7. За допомогою кранів 4 вода могла розпилюватися або з одиночної форсунки (верхньої чи нижньої), або разом із двох форсунок. Безпосередньо перед форсунками було встановлено манометр 8. З форсунок 7 рідина, що розпилювалася у вигляді конусоподібного факела, потрапляла в піддон 1 і звідти за допомогою насоса 2 потрапляла в напірну магістраль. Таким чином здійснювалася робота другого контуру циркуляції. За допомогою регулюючих пристроїв 4 і 5 встановлювалася необхідна витрата води через форсунки, і за показаннями манометра 8 контролювався робочий тиск. Під час дослідів витрата води через форсунки визначалася за допомогою лічильника 6. Експериментальний стенд забезпечував витрату води до $11,3 \text{ м}^3/\text{год}$ ($3,13 \text{ л/с}$) і тиск перед форсункою до 2 атм (у дослідах максимальний тиск води був 1,4 атм), що відповідає умовам роботи відцентрових форсунок у градирнях.

Стенд був обладнаний електроконтактним пристроєм 10 для вимірювання товщини кільця рідини, що витікає з сопла. Контактна голка 9 пристрою була встановлена на спеціальному координатнику, який забезпечував просторове переміщення голки для підведення її в потрібну точку соплового отвору форсунки. Для візуального спостереження процесів розпилювання стенд був обладнаний лампою 11 неперервного освітлення та імпульсною лампою 12, частоту спалахів якої можна було регулювати за допомогою стробоскопа 13. З метою визначення розмірів крапель, що утворювались при диспергуванні, стенд був укомплектований аналізатором 14 дисперсного складу (АДС). Принцип його роботи базується на лічильно-імпульсному методі, який полягає у вимірюванні частоти замикань розпиленими краплями торців голок-електродів, відстань між якими збільшується послідовно із заданим кроком переміщення [6]. За допомогою спеціального пристрою АДС міг бути розміщений в будь-якій точці факела розпилу. Аналізатор був з'єднаний кабелем із блоком живлення 15 та персональним комп'ютером 16.

У дослідах використовувались відцентрові форсунки великої продуктивності [3], розміри

яких були подібні до працюючих у промислових градирнях. Форсунки мали один тангенціальний вхідний канал і були виготовлені з урахуванням конструктивних особливостей, що визначають сучасний підхід до розробки відцентрових розпилювачів рідини. Вхідні канали форсунок мали квадратний перетин, що забезпечувало більш рівномірний розподіл потоку води на вході в камеру закручування. Крім того, потік на вході в камеру підтискувався спеціальним звуженням каналу ("стрілкою") до різної величини h таким чином, що вхідний перетин потоку рідини в камеру закручування ставав прямокутним. Змінювалася і відстань від осі сопла до осі вхідного каналу (плече закручування). Така конструкція відцентрових форсунок у кінцевому підсумку покращувала гідродинаміку витікання води з соплового отвору. Треба також відзначити, що прямокутні канали є більш технологічними для виробництва форсунок і потребують менших витрат на їх виготовлення. Діаметр камери закручування D_k у дослідах дорівнював 100 и 50 мм.

При дослідженні фракційного складу крапель пара форсунок розміщувалася на експериментальному стенді співвісно одна до одної вздовж вертикальної осі (рис. 1). За допомогою спеціального пристрою відстань E між зрізами сопел верхньої та нижньої форсунок могла змінюватися. Це дозволяло організувати взаємодію зустрічних потоків рідини на різній відстані, як конусоподібними плівками, так і краплями – після подрібнення плівки. Досліди проводилися як із двома ідентичними форсунками, так і з форсунками, які відрізнялися одна від одної геометричними розмірами. При цьому кути розкриття для верхньої та нижньої форсунок були різними.

На основі проведених експериментів було зроблено висновок, що блок форсунок забезпечує більш інтенсивне диспергування рідини порівняно з одиночною форсункою, якщо зустрічні факели розпилу взаємодіють плівками, а не краплями. Тому всі експерименти проводилися в умовах, коли факели розпилу гарантовано взаємодіяли плівками.

На рис. 2 показано функцію об'ємного розподілу крапель за розмірами δ , яка отримана внаслідок взаємодії двох зустрічних потоків у блоці однакових форсунок (позначено \blacklozenge) при відстані між ними $E = 60 \text{ мм}$ і тиску рідини $P = 0,4 \text{ атм}$ ($D_k = 50 \text{ мм}$, діаметр сопла $d_c = 20 \text{ мм}$, $h = 10 \text{ мм}$), а також функції, які відповідають таким же одиночним форсункам із витіканням води вгору (\circ) та вниз (\bullet). Ці дані свідчать, що максимальний роз-

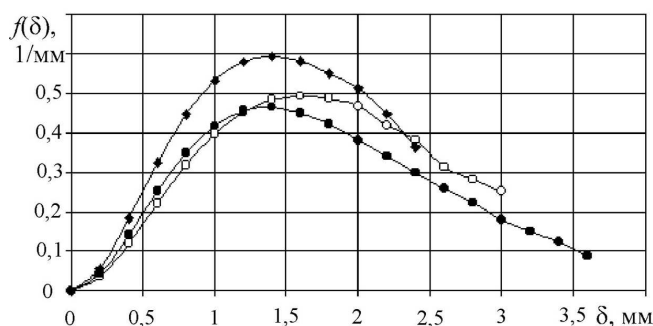


Рис. 2

мір крапель, що утворюються при диспергуванні рідини в блоці ($\delta_{max} = 2,4$ мм), менший, ніж при розпилюванні з одиночних форсунок ($\delta_{max} = 3$ і $3,6$ мм). Така картина спостерігалась в усіх досліджених режимах взаємодії та за всіх геометричних розмірів форсунок.

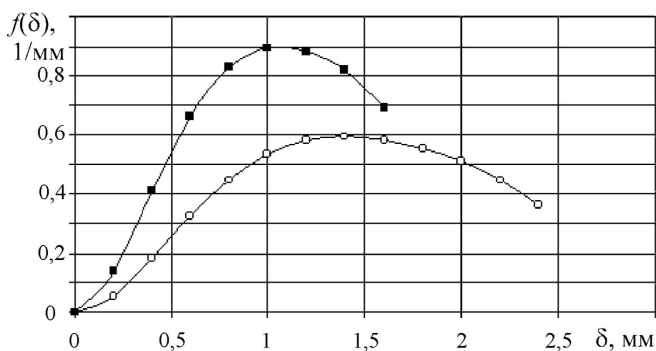


Рис. 3

На рис. 3 показано вплив розміру сопла на фракційний склад крапель у блоці: $d_c = 20$ мм (позначено о) і $d_c = 12,5$ мм (■) при $D_k = 50$ мм, $h = 10$ мм, $E = 60$ мм, $P = 0,4$ атм. Зі збільшенням діаметра сопла максимальний розмір крапель істотно зростає, що пояснюється збільшенням товщини кільця витікання рідини з сопла, яка і визначає максимальний розмір крапель. Відповідно зміщується і мода функції розподілу в бік більш крупних крапель.

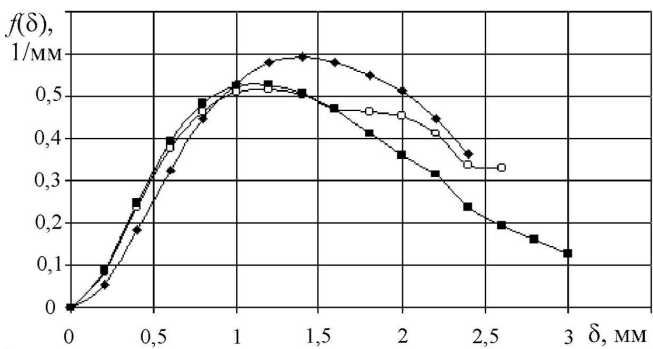


Рис. 4

Рис. 4 ілюструє вплив відстані між форсунками на фракційний склад крапель у блоці: $E = 60$ мм (позначено ◆); $E = 120$ мм (о); $E = 210$ мм (■) при

$D_k = 50$ мм, $d_c = 20$ мм, $h = 10$ мм, $P = 0,4$ атм. Максимальні розміри крапель при $E = 60$ і 120 мм мало відрізняються між собою, але при $E = 210$ мм, коли зустріч потоків відбувається близько до межі руйнування плівки, помітно збільшення δ_{max} , яке наближається до максимального розміру крапель при розпилюванні з одиночних форсунок.

Досліди показали, що мода функцій розподілу слабо залежить від відстані між форсунками. Але за малих E ($E = 60$ мм) мода дещо зміщується в бік більш крупних крапель. Ймовірно, це пояснюється тим, що взаємодія конусоподібних плівок на невеликих E (поблизу до зрізу сопла) відбувається більш товстими ділянками плівок.

Експериментальні дані для блока однакових форсунок обробляли, як і для одиночних, у вигляді

$$f(\delta) = a\delta^b \exp(-c\delta). \quad (1)$$

Для коефіцієнта c було отримано залежність

$$c/c_1 = 0,996 - 0,000761 E/d_c,$$

де c_1 – коефіцієнт в (1) для одиночної форсунки [4],

$$c_1 = 2,07(D_k/d_c)^{0,34}(F_{вх}/F_{\phi})^{-0,13}Re_c^{-0,09} \quad (2)$$

де $F_{вх}$ – площа вхідного каналу; F_{ϕ} – площа заповнення рідиною камери закручування; $Re_c = V_c \Delta / \nu$; V_c – швидкість рідини на зрізі сопла; ν – її кінематична в'язкість; Δ – товщина кільця рідини на зрізі сопла [3]. У зв'язку з тим, що c/c_1 мало відрізняється від одиниці, на практиці можна прийняти $c = c_1$.

Знайдено також залежність для коефіцієнта b :

$$b/b_1 = 1,006 - 0,0183 E/d_c,$$

де для одиночної форсунки згідно з [4] $b_1 = 2,23$. У кінцевому вигляді

$$b = 2,243 - 0,041 E/d_c. \quad (3)$$

Для максимального розміру δ_{max} крапель, що утворюються при диспергуванні рідини блоками форсунок, отримано

$$\delta_{max} = \Delta(0,71 + 0,019 E/d_c). \quad (4)$$

Усі вказані залежності є справедливими в діапазоні $3 \leq E/d_c \leq 14$. Нагадаємо, що відстань E між форсунками в блоці (при взаємодії потоків плівками) має обмеження по максимуму і залежить від довжини l плівки, що не розпалася на краплі, та кута ϕ розкриття факела. Щодо мінімальної величини E , обмеження зумовлено конструктивним фактором – можливістю удару потоку по фланцю форсунки. Проведені нами досліді відповідають діапазону $0,58 \cos(\phi/2) \leq E/l \leq 1,8 \cos(\phi/2)$.

Таким чином, формули (1) – (4) дозволяють за відомими геометричними характеристиками форсунок і режимами витікання визначити дисперсний склад крапель у факелі розпилу блоків.

Узагальнення математичної моделі охолодження крапель у градирні

Математична модель [5] складається з диференціальних рівнянь для діаметра крапель j -ї фракції δ_j , її масової витратної концентрації μ_j , швидкості v_j і температури T_j , а також для температури повітря T_a і густини водяної пари в ньому ρ_v . При інтегруванні цієї системи для основної частини градирні (від розпилювальних пристроїв до басейну) виникають певні труднощі, пов'язані з тим, що початкові умови для параметрів крапель задаються на рівні форсунок ($z = z_0$), а для повітря – внизу ($z = z_f$). Тому було розроблено такий ітераційний алгоритм: задаємо деякі значення T_{a0} , ρ_{v0} , інтегруємо систему вниз до перетину f і в разі розбіжності заданих і розрахованих значень T_{af} , ρ_{vf} інтегрування повторюємо з новими T_{a0} , ρ_{v0} до досягнення необхідної точності.

Задані (реальні) величини T_{af} , ρ_{vf} позначимо верхнім індексом *, а значення всіх величин на i -й ітерації – індексом (i). За результатами розрахунку на i -й ітерації вихідні дані для $(i+1)$ -ї обчислюються як

$$T_{a0}^{(i+1)} = T_{a0}^{(i)} + k_T(T_{af}^* - T_{af}^{(i)}); \quad (5)$$

$$\rho_{v0}^{(i+1)} = \rho_{v0}^{(i)} + k_p(\rho_{vf}^* - \rho_{vf}^{(i)}),$$

де $k_l < 1$, $k_l \sim 1$ ($l = T, \rho$). Ці коефіцієнти враховують ту обставину, що інтенсивність міжфазного тепло-і масообміну певною мірою залежить від початкових значень T_{a0} , ρ_{v0} . Проведені розрахунки показали, що ітераційний процес збігається якнайшвидше при $k_T = 0,7 \div 0,9$; $k_p = 0,7 \div 0,9$. Як приклад у таблиці наведено деякі результати розрахунків при $T_{af}^* = 20^\circ\text{C}$; $\rho_{vf}^* = 0,00877$ кг/м³; $k_T = k_p = 0,8$.

Таблиця. Ітераційний процес для початкових значень T_{a0} , ρ_{v0}

Номер ітерації	T_{a0} , °C	$10^3 \rho_{v0}$, кг/м ³	T_{af} , °C	$10^3 \rho_{vf}$, кг/м ³
1	27,10	23,50	24,17	17,67
2	23,77	16,38	20,13	8,30
3	23,67	16,75	19,96	8,90
4	23,70	16,65	20,01	8,73

Як відзначалося вище, модель [5] передбачає, що всі краплі, починаючи зі вхідного перетину $z = z_0$, рухаються вниз (тобто це накладає певні

обмеження на фракційний склад крапель і швидкість повітря). Проте в дійсності розпилювання призводить до утворення полідисперсних ансамблів, до складу яких входять також досить дрібні краплі (див. рис. 2–4). Ці краплі при реальних швидкостях повітря рухаються вгору; як правило, на їх шляху встановлюються вловлювачі, з яких після накопичення певної кількості рідини зриваються великі краплі, що потім падають до нижнього перетину z_f . Тому для врахування цього явища в алгоритм було внесено такі зміни.

Спочатку в перетині z_0 для кожної фракції j розраховується сума сил, що діють на них, і відповідно весь полідисперсний ансамбль, що складається з n фракцій, розділяється на два підансамблі: $j = 1 \div j_1$ (дрібні краплі, що рухаються вгору) та $j = (j_1 + 1) \div n$ (краплі, що падають). Далі на кожній ітерації i рівняння руху та тепломасообміну для першого підансамблю інтегруються вгору від z_0 до перетину z_c , де встановлено вловлювачі. Тут "народжується" нова фракція $p = n+1$. Її концентрація та температура обчислюються за очевидними формулами

$$\mu_{pc} = \zeta \sum_{j=1}^{j_1} \mu_{jc}; \quad T_{pc} = \left(\sum_{j=1}^{j_1} \mu_{jc} \right)^{-1} \sum_{j=1}^{j_1} \mu_{jc} T_{jc},$$

де ζ – коефіцієнт уловлювання [7, 8]. Початковий розмір крапель нової фракції визначається за рекомендаціями [7]. Потім рівняння руху та тепло-масообміну фракції p інтегруються від z_c до z_0 . Нарешті, розраховується еволюція стану крапель $j = (j_1 + 1) \div p$ і повітря на ділянці $z_0 - z_f$.

Слід зауважити, що описаний підхід, коли верхня секція градирні ($z = z_0 \div z_c$) розраховується двічі (для першого підансамблю вгору і для крапель p вниз), призводить до певної похибки у визначенні параметрів повітря. Тому було розроблено інший варіант алгоритму, де верхня секція розраховується один раз для всіх фракцій (звичайно, для цього треба було побудувати внутрішній ітераційний процес для μ_{pc} , T_{pc} , δ_{pc} , подібний до описаного вище). Але співставлення результатів розрахунків за обома версіями показало, що різниця в параметрах повітря не перевищує 0,3 %, і було вибрано перший, більш простий варіант. Описаний алгоритм було реалізовано в програмному комплексі GRAD3.

Визначення оптимального режиму охолодження циркуляційної води в градирні

Цільовою функцією при охолодженні води найбільш природно вибрати різницю між її по-

чатковою температурою T_0 та середньою температурою на виході

$$\Delta T = T_0 - \left(\sum_{j=j_1+1}^p \mu_{jf} \right)^{-1} \sum_{j=j_1+1}^p \mu_{jf} T_{jf}.$$

До числа параметрів, що повністю визначають характеристики робочого процесу в градирні, належать початкові температури T_0 , T_{af} , вологість повітря на вході ρ_{vf} , сумарна концентрація крапель μ та їх фракційний склад (тобто b , c , δ_{max}). Проте немає сенсу шукати оптимальні умови охолодження в цьому семивимірному просторі, оскільки воно буде тим більше, що більшою буде різниця температур $T_0 - T_{af}$ та що меншими ρ_{vf} і μ . Тому доцільно для подальшого зафіксувати ці величини. Обираємо типові умови $T_0 = 30^\circ\text{C}$; $T_{af} = 15^\circ\text{C}$; $\rho_{vf} = 0,0045 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 1$. Таким чином, приходимо до тривимірного простору $b - c - \delta_{max}$. Аналіз досвіду експлуатації градирень, а також результатів наших експериментів приводить до таких обмежень значень цих факторів: $b = 1,67 \div 2,1$; $c = 1,05 \div 2,5 \text{ 1/мм}$; $\delta_{max} = 1,6 \div 6,4 \text{ мм}$. Але треба враховувати також два додаткових обмеження: $\delta_m = b/c = 0,8 \div 2 \text{ мм}$; $L = \delta_{max}/\delta_m = 1,5 \div 5$. Таким чином, область пошуку в координатах $b - c$ має вигляд п'ятикутника ABCDE, зображеного на рис. 5а.

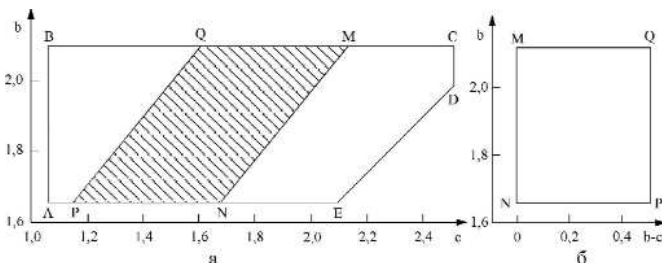


Рис. 5

Наприклад, температура води дорівнює 30°C . При цьому прихована теплота випаровування $r = 2420 \text{ кДж/кг}$. Якщо припустити, що під час руху в градирні випаровується 1,5% рідини, це призведе до зниження її температури на $\Delta T_e = 0,015 r/c_p \approx 8,7 \text{ град}$ (c_p – питома теплоємність). Оскільки типові значення ΔT такого ж порядку, можна зробити висновок, що охолодження здійснюється в основному за рахунок фазового переходу. Як відомо, в енергетиці діють жорсткі нормативи щодо відсотку ξ випаровування циркуляційної води при охолодженні в градирні, що залежать від температури повітря T_{af} . Згідно з [9] за прийнятої температури $T_{af} = 15^\circ\text{C}$ максимально допустиме значення ξ дорівнює $\xi_{max} = 0,13 \Delta T$. Приймаючи $\Delta T \approx 10 \text{ град}$, маємо $\xi_{max} = 1,3\%$. Зро-

зуміло, що область оптимальних режимів охолодження відповідає максимально допустимому значенню ξ . Отже, область пошуку на рис. 5а слід звузити до такої підобласті значень b , c і δ_{max} , де $\xi = \xi_{max}$.

Розрахунки з допомогою програмного комплексу GRAD3 дозволили встановити, що зазначена підобласть відповідає трапеції MNPQ на рис. 5а, причому на лінії MN відношення $L = 5$, а на лінії PQ – $L = 1,5$. Для внутрішніх точок підобласті було підібрано формулу

$$L = 1,324 + 3,368 \exp[-5,844(b - c)],$$

де, як і раніше, c в 1/мм.

Для подальшого зручно перейти від координат $b - c$ до координат $b - (b - c)$ (рис. 5б, де лінія MN відповідає $b - c = -0,015$, а лінія PQ – $b - c = 0,505$). Розрахунки ΔT для границь підобласті MNPQ і її внутрішніх точок дають значення $\Delta T = 9,38 \div 9,67 \text{ град}$. Отже, цю підобласть можна вважати "майже стаціонарною" за термінологією [10], і тому для її дослідження найбільш доцільно побудувати квадратичне рівняння регресії. Оскільки L є функцією b і c , досить розглянути двовимірний простір $b - (b - c)$. У кодових змінних $x_1 - x_2$ (де $x_1 = (b - c - 0,245)/0,26$; $x_2 = (b - 1,885)/0,215$) отримане рівняння має вигляд

$$\delta T = 436 - 93,3 x_1 - 45,86 x_2 + 38 x_1^2 + 2,5 x_2^2 + 4,5 x_1 x_2, \quad (6)$$

де $\delta T = (10 - \Delta T) 10^3$.

Приводячи поверхню (6) до головних осей, маємо $\delta T = A + 38,1 (x_1^0)^2 + 2,4 (x_2^0)^2$, отже, вона являє еліптичний параболоїд. Координати мінімуму функції δT такі: $x_1 = 0,725$; $x_2 = 8,52$; $\delta T = 207$, тобто він лежить поза межами області пошуку, і тому слід обрати таку точку цієї області, що забезпечить найменше δT (і мінімальну середню температуру крапель). З формули (6) випливає, що це точка Q на рис 5 ($b = 2,1$; $c = 1,595 \text{ 1/мм}$; $L = 1,5$), де $\Delta T = 9,67 \text{ град}$.

Насамкінець оцінимо економічну ефективність впровадження оптимального режиму охолодження циркуляційної води. Щоб обрати режим для порівняння, ми проаналізували умови експериментів (див. вище), що забезпечують інтенсивне диспергування рідини, і для кожного з цих дослідів розраховували її охолодження і випаровування. З'ясувалось, що серед режимів із $\xi \leq \xi_{max}$ найкращий результат становить $\Delta T = 8,53^\circ\text{C}$, тобто оптимізація розпилювання дозволяє знизити температуру води на $1,14^\circ\text{C}$ порівняно з цим режимом. Згідно з реко-

мендаціями [11] збільшення ΔT на $1,14^\circ\text{C}$ призводить до підвищення потужності енергоблока 300 МВт на 0,65 МВт. Приймаючи тривалість роботи енергоблока 6500 год/рік, середню теплоту

згорання вугілля 5000 ккал/кг, його середню ціну 0,18 грн/кг і витрату палива 380 г у. п./кВт·год, знаходимо вартість зекономленого палива на один енергоблок – $C \approx 400$ тис. грн./рік.

1. Подвысоцкий А.М., Дубровский В.В., Кидалюк С.Е., Довгопол М.В. Энергоэффективное устройство для распыливания воды центробежными форсунками низкого давления // Проблемы загальної енергетики. – 2001. – № 4. – С. 54–57.
2. Гончаров В.В. Особенности аэродинамики, тепло- и массообмена в башенных брызгальных градирнях // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – Л., 1977. – Вып. 115. – С. 205–210.
3. Дубровский В.В., Подвысоцкий А.М., Баштовой А.И. и др. Особенности диспергирования жидкости при взаимодействии факелов распыла из центробежных форсунок // Промислова гідраліка і пневматика. – 2005. – № 4. – С. 39–44.
4. Дубровский В.В., Подвысоцкий А.М., Баштовой А.И. Повышение охлаждающей способности градирни за счет увеличения поверхности охлаждения при распыливание воды центробежными форсунками // Проблемы загальної енергетики. – 2006. – № 14. – С. 52–56.
5. Шрайбер А.А., Баштовой А.И. Математическое моделирование тепломассообменных процессов в градирнях нового поколения // Пром. теплотехника. – 2005. – № 5. – С. 28–33.
6. Дубровский В.В., Подвысоцкий А.М., Баштовой А.И. и др. Устройство для анализа дисперсного состава распыленной жидкости // Физика аэродисперсных систем. – 2004. – Вып. 41.
7. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. – М.: ГЭИ, 1957. – 320 с.
8. Морозов В.А., Альтман В.М. Водоуловители в башенных градирнях с естественной тягой // Труды координационных совещаний по гидротехнике – ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – Л., 1968. – Вып. 44. – С. 79–86.
9. Альтман В.М., Морозов В.А. Уточнение потерь воды на испарение в башенных градирнях по данным натурных исследований // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – Л., 1977. – Вып. 115. – С. 172–175.
10. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
11. Морозов В.А., Кудрявцев В.И. Влияние температуры охлажденной воды на технико-экономические показатели ТЭС и АЭС // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – Л., 1977. – Вып. 115. – С. 11–15.