

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 66.074.51

О.А. ШРАЙБЕР, д-р техн. наук, **В.В. ДУБРОВСЬКИЙ**, канд. техн. наук,
О.М. ПІДВИСОЦЬКИЙ, канд. техн. наук, **В.Б. РЕДЬКІН**, канд. техн. наук
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

ВПЛИВ НЕРІВНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ ЩІЛЬНОСТІ ЗРОШУВАННЯ НА ОХОЛОДЖЕННЯ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ВОДИ У КРАПЛИННІЙ ГРАДИРНІ

Розроблено метод порівняння варіантів розподілу щільності зрошування по площі горизонтального перетину краплинної градирні та визначення його впливу на ефективність охолодження циркуляційної води. Метод дозволяє визначити оптимальне розташування блоків форсунок по площі градирні.

Ключові слова: краплинна градирня, інтегрування рівнянь переносу, щільність зрошування, охолодження, циркуляційна вода.

Вступ. Важливою операцією у процесі виробництва електроенергії на теплових і атомних електростанціях є охолодження циркуляційної води, яке часто здійснюється у краплинних градирнях. В енергетиці і промисловості такі пристрої використовуються багато років, але можливості істотного підвищення їх ефективності ще далеко не вичерпані. Свого часу авторами було виконано серію досліджень особливостей робочого процесу у краплинних градирнях. Зокрема, було вивчено фракційний склад ансамблю крапель, що утворюється під час розпилювання води відцентровими форсунками, розроблено математичну модель процесів переносу у краплинній градирні і відповідну програму GRAD3, та визначено оптимальний режим розпилювання, що дозволяє при допустимому ступені випаровування води отримати максимальне її охолодження [1–3]. Необхідно відзначити, що при протитечійному русі крапель і повітря, коли початкові умови для них задаються у різних перетинах потоку, виникає необхідність у побудові спеціальних алгоритмів інтегрування рівнянь переносу. Алгоритм, на якому ґрунтується програма GRAD3, пов'язаний з інтегруванням рівнянь для повітря проти течії, “з майбутнього в минуле”, і тому він працює не при всіх значен-

нях визначальних параметрів. Крім того, в роботі [3] не враховувалась нерівномірність розподілу води по площі перетину градирні, що може істотно впливати на темп її охолодження. Тому метою цієї роботи є побудова більш універсального алгоритму інтегрування рівнянь протитечійного руху двофазової суміші та розроблення методу порівняння варіантів розподілу щільності зрошування по перетину градирні.

Алгоритм інтегрування рівнянь переносу. Розрахунок складається з кількох ітерацій, кожна з яких включає два етапи: 1) інтегрування рівнянь для крапель (вниз), починаючи з перетину, де встановлено розбризкувальні пристрої; 2) інтегрування рівнянь для повітря (знизу вгору). На першому етапі ітерації 1 певним чином задається розподіл параметрів повітря (температури та густини водяної пари) по висоті робочого об'єму. Наприклад, їх можна прийняти сталими і рівними або початковим, або деяким середнім по висоті значенням, що оцінюються заздалегідь. На цьому етапі запам'ятовуються обчислені параметри крапель у кількох перетинах (позначимо їх через P_1). На другому етапі цієї ітерації інтегруються рівняння для повітря з урахуванням масиву P_1 , а отримані результати (позначимо їх через Q_1) запам'ятовуються. Далі, на першому етапі ітерації 2 знов інтегруються рівняння для крапель, але вже з урахуванням значень Q_1 , і

результати (P_2) запам'ятовуються, а на другому етапі – рівняння для повітря на базі P_2 і т. д.

Ітерації припиняються, коли модуль різниці між значеннями деяких вибраних параметрів на двох сусідніх ітераціях стає менше заданого ϵ . Оскільки метою розрахунку є не стільки визначення локальних параметрів потоку, скільки знаходження ступеня охолодження циркуляційної води, ітераційний процес можна припинити за умови $|t_{mf} - t_{m-1f}| < \epsilon$, де t_f – середня температура крапель на виході з градирні, m – номер ітерації.

Цей алгоритм вигідно відрізняється від попереднього [3] тим, що рівняння для повітря інтегруються “з минулого в майбутнє”, і тому в широкому діапазоні визначальних параметрів розв'язок не заходить у нефізичну область. Експлуатація програми GRAD4, розробленої на основі описаного алгоритму, показала, що для реальних значень визначальних параметрів достатньо виконати дві (максимум три) ітерації для досягнення прийнятної точності розрахунку.

Дослідження розподілу щільності зрошування по перетину градирні. Свого часу авторами було проведено широке експериментальне дослідження розподілу води, що розбризкується одиничними відцентровими форсунками або їх блоками (парами форсунок з факелами розпилу, спрямованими назустріч один одному), по горизонтальній площині (див. [4]). Встановлено, що на всіх режимах безпосередньо під форсунками утворюються “мертві” зони, вільні від крапель. Якщо розпилювання проводиться блоками форсунок, то зона зрошування помітно збільшується порівняно з одиничною форсункою, а мертва зона зменшується. На рис. 1, як приклад, подано результати семи серій дослідів із блоками однакових форсунок, умови яких наведено у табл. 1. При цьому, щоб не створювати надто складну процедуру побудови топографії зрошуваної площини (при накладанні зон зрошування сусідніх форсунок або блоків, див. нижче), ці зони розділено на три кільцеві області рівної ширини.

Таблиця 1 – Умови семи серій дослідів

Номер серії дослідів	Діаметр сопла, мм	Відстань між зрізами сопел, мм	Тиск води перед форсунками, ат
1	20	60	0,4
2	20	60	0,2
3	15	60	0,4
4	15	120	0,4
5	15	60	0,2
6	15	120	0,2
7	20	120	0,4

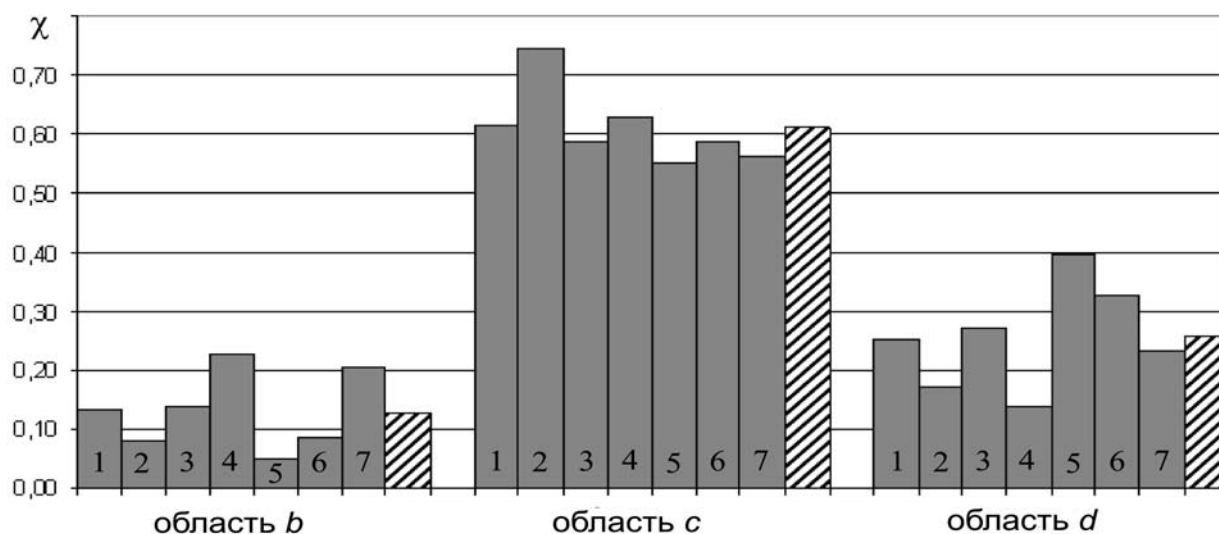


Рис. 1. Розподіл рідини по трьох областях зони зрошування

Далі будемо позначати мертву зону літерою a , а області зони зрошування – b , c і d , починаючи від мертвої. Осереднені значення часток розпиленої рідини по семи серіях показані на рис. 1 заштрихованими стовпчиками.

Метод порівняння варіантів розподілу щільності зрошування по площі перетину краплинної градири. Для визначеності розглянемо цей метод на прикладі використання осереднених даних, наведених на рис. 1. У цих дослідах радіус зони зрошування дорівнював $R_e = 4$ м, а радіус мертвої зони навколо осі блока – $R_i = 0,75$ м. Зовнішні радіуси областей b та c становили $R_1 = 1,833$ м, $R_2 = 2,917$ м. Площі мертвої зони та трьох вказаних областей дорівнюють $F_a \approx 0,56\pi$; $F_b \approx 2,8\pi$; $F_c \approx 5,15\pi$; $F_d \approx 7,5\pi$. Розподіл води між областями в цих дослідах у середньому становить $\chi_b = 0,133$; $\chi_c = 0,611$; $\chi_d = 0,256$ (див. рис. 1).

Спочатку для вибраних вхідних параметрів (розмірів δ_{i0} та масових витратних концентрацій μ_{i0} фракцій крапель, їх початкової швидкості u_{i0} і температури t_{i0} , швидкості u_g і початкової температури t_{gf} повітря, а також густини водяної пари в ньому ρ_{vf}) розраховувався варіант ідеально рівномірного розподілу води по площі градири, і знаходилась середня температура води у нижньому перетині (індекс f):

$$t_{mf} = \sum_{i=1}^n t_{if} \mu_{if} \left(\sum_{i=1}^n \mu_{if} \right)^{-1}. \quad (1)$$

Тут n – кількість фракцій; величини з індексом 0 відносяться до верхнього перетину робочого об'єму.

Далі розглядаємо умовний варіант розподілу щільності зрошування, ототожнюючи зону зрошування, описану вище, з усією площею горизонтального перетину градири. (Зазначимо, що цей варіант відповідає дуже нерівномірному розподілу рідини). Спочатку визначаємо частки площі зони зрошування, що займають три області:

$$\begin{aligned} \omega_b &= F_b / (F_b + F_c + F_d) = 0,181; \\ \omega_c &= 0,333; \quad \omega_d = 0,486. \end{aligned} \quad (2)$$

Обчислюємо умовні щільності зрошування (УЩЗ), відкидаючи сталий множник π :

$$\begin{aligned} \varphi_b &= \chi_b / F_b = 0,0475; \quad \varphi_c = 0,119; \\ \varphi_d &= 0,0342, \text{ м}^2. \end{aligned} \quad (1)$$

При цьому середнє значення УЩЗ становить

$$\varphi_m = 1 / (F_b + F_c + F_d) = 0,0649 \text{ м}^2. \quad (4)$$

Нарешті, із (3), (4) знаходимо нормовані значення УЩЗ:

$$\psi_b = \varphi_b / \varphi_m = 0,733; \quad \psi_c = 1,838; \quad \psi_d = 0,528. \quad (5)$$

Звичайно, знайдені значення задовольняють умови $\omega_k \psi_k = \chi_k$ ($k = b, c, d$), що є додатковим свідченням коректності наших міркувань. Видно, що області b і d бідні на воду, а область c – багата.

Таким чином, питома витрата води g в областях b, c, d повинна відрізнятись від “рівномірного” варіанта множителем ψ , і тоді загальна її витрата зберігається (нагадаємо, що $\sum_k \chi_k = 1$). На перший погляд, тепер достатньо для кожної області k помножити всі μ_{i0} на ψ_k і розрахувати охолодження води при тих же початкових умовах, що і для “рівномірного” варіанта. Проте такий (найпростіший) підхід слід визнати не зовсім коректним. Річ у тім, що за наявності областей, в яких мало і багато води, навряд чи розподіл повітря по перетину градири буде рівномірним. Вважаємо, що перепад тиску під час руху повітря через ансамбль крапель буде у першому наближенні пропорційний μu_g^2 . Оскільки $g \sim \mu u_g$, то, приймаючи таку гіпотезу, доходимо висновку, що значення μ_{i0} для області k слід помножити на ψ_k^2 , а u_g розділити на ψ_k , і при цьому g_{i0} будуть відрізнятись від “рівномірного” варіанта множителем ψ_k .

Проте і цей алгоритм потребує певного коректування: разом із збереженням загальної витрати води, необхідно також зберегти і загальну витрату повітря. Відношення між витратами повітря для варіантів, що розглядаються, буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} A &= \omega_b / \psi_b + \omega_c / \psi_c + \omega_d / \psi_d = \\ &= 0,181 / 0,733 + 0,333 / 1,838 + \\ &\quad + 0,486 / 0,528 = 1,349. \end{aligned} \quad (6)$$

Отже, щоб зберегти загальну витрату повітря, треба ще всі швидкості розділити, а всі концентрації помножити на A . В результаті для областей b, c, d коефіцієнти для концентрацій будуть такими: 0,723; 4,56; 0,375, а для u_g – 1,012; 0,403; 1,405.

Цей алгоритм було реалізовано для розрахунків із такими початковими умовами при рівномірному розподілі: $n = 10$; $\mu_{i0} = 0,1$; $\delta_{10} = 1,5$ мм; $\delta_{i0} = \delta_{i-10} + 0,5 \cdot i$ мм ($i = 2, \dots, 10$); $t_{i0} = 35$ °C; $t_{gf} = 15$ °C; $u_g = -2$ м/с; $\rho_{vf} = 0,0049$

Таблиця 2 – Параметри крапель на виході із градирні (варіант А)

i	δ_{gr} , мм	$\mu_{gr} \cdot 10^2$	u_{gr} , м/с	t_{gr} , °C
1	1,489	9,777	3,30	18,51
2	1,991	9,864	4,73	24,75
3	2,492	9,906	5,34	27,94
4	2,993	9,932	5,78	29,83
5	3,494	9,948	6,10	31,04
6	3,994	9,958	6,33	31,87
7	4,495	9,966	6,50	32,45
8	4,995	9,972	6,60	32,88
9	5,496	9,976	6,67	33,21
10	5,996	9,979	6,71	33,46

Таблиця 3 – Умови розрахунків по варіанту В

Номер регіону j	Номери площадок на рис. 2	Формула зрошування	ω_j	ϕ_j	$\omega_j \phi_j$	ψ_j
1	1, 7, 8, 14, 52, 56, 57, 61	$a + 2d$	0,1049	0,0684	0,0072	0,3499
2	2, 6, 9, 13, 44, 47, 48, 51	$b + 2d$	0,2395	0,1159	0,0227	0,5928
3	3, 5, 10, 12, 22, 25, 27, 29, 33, 35, 38, 41, 45, 46, 49, 50	$b + c + d$	0,1818	0,2007	0,0365	1,0266
4	4, 11, 23, 24, 28, 34, 39, 40	$2c + 2d$	0,3077	0,3064	0,0943	1,5673
5	16, 19, 31, 36, 42, 54, 59	$2c$	0,0507	0,238	0,0121	1,2174
6	15, 17, 18, 20, 21, 26, 30, 32, 37, 43, 53, 55, 58, 60	$b + c$	0,0979	0,1665	0,0163	0,8517
7	62 – 73, 74, 75	$b + d$	0,0175	0,0817	0,0014	0,4179
Усього:			1,0		0,1955	

кг/м³ (варіант А). Параметри крапель у нижньому перетині наведено у табл. 2.

Цікаво, що найбільш крупні краплі встигають охолотитися тільки на 1,5 °C. Середня температура охолодженої води згідно з (1) становить $t_{mf}^A = 29,62$ °C.

Розрахунок охолодження води у трьох областях (варіант Б) із зазначеними коефіцієнтами для μ_{i0} та u_{gf} привів до таких результатів: $t_{mf}^b = 29,39$ °C; $t_{mf}^c = 31,61$ °C; $t_{mf}^d = 28,44$ °C; тоді середня температура по градирні

$$t_{mf}^B = \chi_b t_{mf}^b + \chi_c t_{mf}^c + \chi_d t_{mf}^d = 30,51^\circ\text{C}. \quad (7)$$

Таким чином, нерівномірний розподіл води підвищує її температуру на 0,89 °C. Такий розрахунок, як вже зазначалося, носить дещо умовний характер: по-перше, ми не враховували мертву зону радіусом R_i навколо осі блока; по-друге, якщо зони зрошування від сусідніх блоків не перетинаються, виникають додаткові

мертві зони (наприклад, якщо зони зрошування від сусідніх блоків дотикаються, то це різниця між квадратом $2R_e \times 2R_e$ і колом радіуса R_e).

Наступний числовий експеримент (варіант В) було виконано для випадку коридорного розташування блоків однакових форсунок так, що відстань між осями сусідніх блоків становила $D = R_e = 4$ м (тобто зовнішня межа зони зрошування кожного блока проходила через осі чотирьох сусідніх блоків). Розташування форсунок ілюструється на рис. 2, де показано зовнішні межі мертвої зони та областей b , c і d . Як представницьку чарунку площі горизонтальної перетину градирні розглядаємо далі прямокутник $MNPQ$ ($R_e \times 2R_e$). Нехтуючи малими площадками на рис. 2, виділяємо на прямокутнику 75 великих і середніх площадок. Далі для кожної з них визначаємо щільність зрошування від сусідніх блоків, в результаті чого кожній площадці ставимо у відповідність певну фор-

Таблиця 4 – Результати розрахунків по варіанту В

Номер регіону j	Коефіцієнт		ω_j / ψ_j	Остаточний коефіцієнт		$t_{mf}^j, ^\circ\text{C}$
	для $\mu_{i0} (\psi_j^2)$	для $u_g (1/\psi_j)$		для μ_{i0}	для u_g	
1	0,1224	2,8579	0,2998	0,1561	2,2406	25,88
2	0,3514	1,6869	0,4040	0,4482	1,3225	28,66
3	1,0539	0,9741	0,1771	1,3442	0,7637	30,11
4	2,4564	0,6380	0,1963	3,1331	0,5002	31,13
5	1,4821	0,8214	0,0416	1,8904	0,6440	30,51
6	0,7254	1,1741	0,1149	0,9252	0,9205	29,66
7	0,1746	2,3929	0,0418	0,2227	1,8760	27,15
Усього:			1,2755			

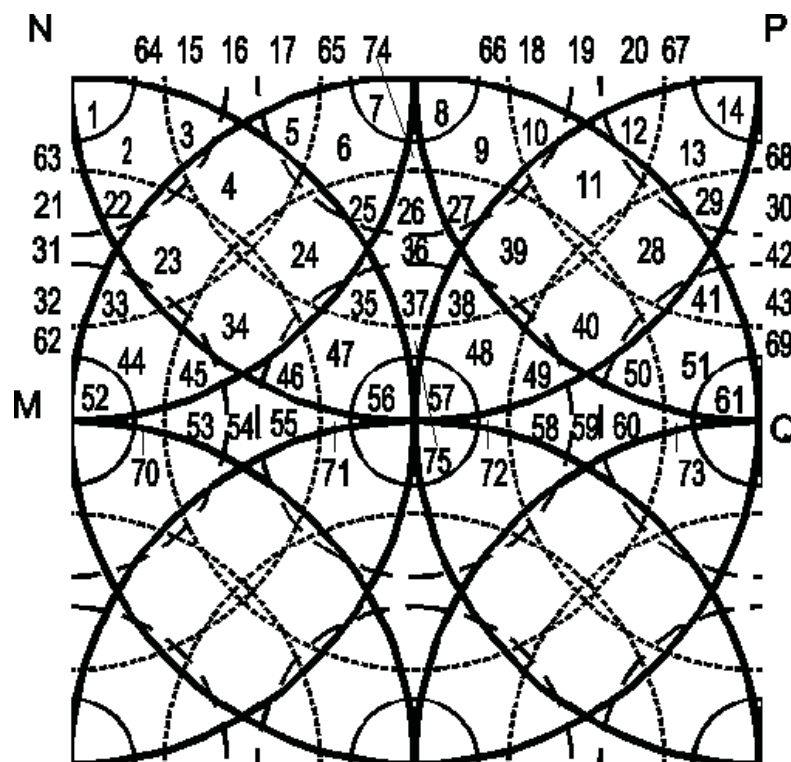


Рис. 2. До розрахунку площ регіонів 1 – 7

мулу зрошування (табл. 3). Наприклад, якщо вибрану площадку зрошують три блоки форсунок, зокрема, один із них рідиною із зони b , а два інші – водою із зони d , то цій площадці приписується формула $b+2d$. Виявилось, що серед усіх 75 площадок налічується тільки 7 регіонів із різними формулами, які далі позначаються цифрами 1–7 (див. табл. 3). Результати розрахунків, що проводяться таким самим чином, як і у варіанті Б, наведено у табл. 3 і 4 (при цьому номери площадок, половина яких належить до прямокутника MNPQ, виділені курсивом).

У наведених таблицях введено такі позна-

чення: ω_j – це частка площі j -го регіону, що визначається за рис. 2; ϕ_j – обчислюються згідно з УЩЗ (3) (наприклад, $\phi_1 = \phi_a + 2\phi_d = 0 + 2 \cdot 0,0342$; $\phi_2 = \phi_b + 2\phi_d = 0,0475 + 2 \cdot 0,0342$ і т. д.); сума стовпчика $\omega_j \phi_j$ – це середнє значення УЩЗ ϕ_m (див. (4)), і $\psi_j = \phi_j / \phi_m$; сума стовпчика ω_j / ψ_j – це безрозмірна витрата повітря A (див. (6)), і остаточні значення коефіцієнтів для μ_{i0} і u_g у кожному регіоні (див. табл. 4) знаходяться з урахуванням A подібно до варіанта Б.

Обчислення середньої температури проводиться подібно до (7); в результаті маємо

$t_{mf}^B = 30,21$ °С. Таким чином, зрошування від кількох блоків дозволяє помітно підвищити ефективність охолодження. Якщо відстань між блоками буде меншою, ніж радіус зони зрошування, то розподіл води буде більш рівномірним, і ефективність охолодження ще збільшиться.

Таким чином, розроблену програму GRAD4 та описаний метод порівняння варіантів розподілу щільності зрошування можна розглядати як інструмент для пошуку шляхів удосконалення та оптимізації робочого процесу у краплинній градирні. Він буде використаний на наступному етапі досліджень.

Насамкінець необхідно оцінити можливий економічний ефект від покращення рівномірності розподілу щільності зрошування. Згідно з оцінками [5] зниження температури циркуляційної води на 1 °С за рахунок більш повного розширення пари в турбіні підвищує потужність енергоблока 300 МВт на 0,19%, тобто на 570 кВт. Приймаючи тривалість експлуатації енергоблока 6500 год/рік, питому витрату вугілля 380 г у.п./кВт-год та його ціну 1200 грн/т у.п., доходимо висновку, що відповідний економічний ефект становитиме ~1,7 млн грн/рік, або для ТЕС із шістьма такими блоками ~10 млн грн/рік.

ВИСНОВКИ

Запропоновано новий ітераційний алгоритм інтегрування системи рівнянь переносу у протічній двофазовому полідисперсному потоці стосовно до робочого процесу у краплинній градирні, та створено відповідну програму GRAD4. Розроблено метод порівняння

варіантів розподілу щільності зрошування по площі горизонтального перетину краплинної градирні та визначення його впливу на темп охолодження циркуляційної води. Ці результати можна розглядати як інструмент для пошуку шляхів удосконалення та оптимізації робочого процесу у краплинній градирні.

1. Шрайбер А. А., Баштовой А. И. Математическое моделирование тепломассообменных процессов в градирнях нового поколения // Пром. теплотехника. – 2005. – № 5. – С. 28–33.
2. Дубровский В. В., Подвысоцкий А. М., Баштовой А. И. Повышение охлаждающей способности градирни за счет увеличения поверхности охлаждения при распыливании воды центробежными форсунками // Проблемы общей энергетики. – 2006. – № 14. – С. 52–56.
3. Шрайбер О. А., Дубровский В. В., Подвысоцкий О. М., Шрайбер К. О. Оптимізація режиму охолодження циркуляційної води у брызгальних градирнях // Проблемы общей энергетики. – 2007. – № 16. – С. 81–86.
4. Шрайбер О. А., Дубровский В. В., Подвысоцкий О. М. та ін. Развитие теории тепломассообмена в гетерогенных средах и разработка методов оптимизации энергетических технологий из двухфазовым рабочим телом: Звіт ІЗЕ НАН України. – Київ, 2006. – 141 с. – № держреєстр. 0104U003263.
5. Морозов В. А., Кудрявцев В. И. Влияние температуры охлаждающей воды на технико-экономические показатели ТЭС и АЭС // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – Л.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1977. – Вып. 115. – С. 11–15.

Надійшла до редакції 27.02.2012