

УДК 627.173.3

ОЦІНКА ДІЇ ВІТРУ НА ПРОЦЕС ПЕРЕМІШУВАННЯ ВОДНИХ МАС У ВОДОЙМИЩІ- ОХОЛОДЖУВАЧІ

Л. Н. Антонова

Ведучий інженер

Тепломеханічний відділ ВАТ Харківський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект»

Д. В. Михайський

Старший викладач*

Контактний тел.: (057) 733-79-43

Г. І. Канюк

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри*

Контактний тел.: (057) 731-15-27

Л. М. Омельченко

Доцент*

Контактний тел.: (057) 733-79-43

В. В. Червоний

Асистент*

Контактний тел.: (057) 733-79-43

А. Р. Місько

Асистент*

Контактний тел.: (057) 733-79-43

*Кафедра теплоенергетики та енергозбереження
Українська інженерно-педагогічна академія
вул. Університетська, 16, м. Харків, Україна, 61003

Проведено теоретичні дослідження дії вітру на процес перемішування водних мас в поверхневому шарі теплої води глибоководних стратифікованих водоймищ-охолоджувачів на базі аналізу рівняння балансу кінетичної енергії.

Ключові слова: водоймище-охолоджувач, пульсаційна енергія, енергія турбулентності.

Проведены теоретические исследования действия ветра на процесс перемешивания водных масс в поверхностном слое теплой воды глубоководных стратифицированных водоемов-охлаждителей на базе анализа уравнения баланса кинетической энергии.

Ключевые слова: водоем-охлаждитель, пульсационная энергия, энергия турбулентности.

Theoretical researches of action of wind are conducted on the process of interfusion of the water masses in the superficial layer of warm water of the deep-water stratified reservoirs-coolers on the base of analysis of equalization of balance of kinetic energy.

Keywords: reservoir-cooler, pulsation energy, energy of turbulence.

Вступ

Теоретичні дослідження проведено на базі аналізу рівняння балансу кінетичної енергії з урахуванням процесів породження під дією зрушення швидкості і взаємодії хвильових і турбулентних рухів, швидкості дисипації пульсаційної енергії, обумовленої перекиданням поверхневих хвиль.

Механізм транспорту пульсаційної енергії зумовлюється утворенням шару кінцевої товщини, в якому відбувається стабілізація процесів конвекції і турбулентної дифузії. Поверхневий теплий шар (епілімніон) із зростанням температури води повільно поширює свою нижню межу в глибину водосховища. При цьому, температура донних шарів теж підвищується, але незначно. Натурні дослідження показали, що в області донного (гіполімніона) і поверхневого (епілімніона) шарів вертикальний температурний градієнт неістотно малий. Між епілімніоном і гіполімніоном присутній шар води, в межах якого температурний градієнт $d\bar{t}/dZ$ набуває максимального

значення. Цю область називають шаром розділу, нижня межа якого є нижньою межею термокліну.

В результаті дії вітру на поверхню розділу «вода — повітря», у верхньому шарі водосховища виникає складна структура турбулентного руху, що складається з:

- деякого середнього перенесення мас у напрямі розподілу основних компонентів, що містять енергію спектру вітрових хвиль, співпадаючого з напрямом приводного вітру;
- впорядкованих орбітальних рухів рідких часток, обумовлених присутністю спектру гравітаційно-капілярних хвиль на поверхні водосховища;
- турбулентних рухів різних масштабів.

Аналіз і результати досліджень

У загальному вигляді рівняння балансу пульсаційної енергії в широкому діапазоні хвильових чисел (або

масштабів турбулентності) може бути визначене за допомогою рівняння [1]:

$$\frac{dE}{dt} = \Pi + D + B - D, \quad (1)$$

де E — кінетична енергія турбулентності; Π — швидкість породження кінетичної енергії турбулентності; D — швидкість дифузійного перенесення кінетичної енергії турбулентності у вертикальному напрямі, яка обумовлена вертикальною неоднорідністю інтенсивності пульсаційного руху; B — швидкість перенесення кінетичної енергії турбулентності під дією сил плавучості; D — швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності.

Розглядається турбулентний режим в поверхневому шарі, виходячи з простої моделі стаціонарного горизонтального однорідного турбулентного потоку із зрушенням швидкості, в якому $u = \bar{U}(Z) + u'$, $w = w'$.

Тут u — горизонтальна компонента швидкості уздовж осі X , співпадаюча з напрямом поширення вітрових хвиль великої амплітуди (і з напрямом приводного вітру); w — вертикальна компонента стічної і дрейфової течій; $\bar{U}(Z)$ — середня швидкість, що включає компоненту дрейфової і стічної течій; Z — вертикальна координата, направлена у гліб водосховища; u' і w' — пульсації швидкості, що включають флуктуації з масштабами поверхневих вітрових хвиль. Період усереднювання T повинен задовольняти умові:

$$T \gg 1/\omega_0,$$

де ω_0 — характерна частота компонент, що містять енергію спектру вітрових хвиль.

При розвиненому хвилюванні інтенсивність турбулентності і її кінетична енергія підтримується ін'єкцією спорадичних спалахів енергії дрібномасштабної турбулентності у момент перекидання хвиль. Плями турбулентності, що утворюються, дифундують на деяку глибину, яка не перевищує довжину перекидаючих хвиль [2], тобто, в межах шару вітрового перемішування. У вертикальному напрямі конвективний і дифузійний потоки енергії передбачаються неістотними в порівнянні зі швидкістю дисипації і породження. Це припущення виходить з механізму формування однорідного турбулентного шару вітрового перемішування. Отже, $dE/dt = 0$ і швидкість дифузійного перенесення (D) виключаємо з розгляду.

З врахуванням вказаних обмежень, рівняння (1) зведемо до вигляду:

$$\Pi + B = D. \quad (2)$$

Швидкість породження енергії турбулентності (Π) може бути представлена у вигляді:

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2, \quad (3)$$

де $\Pi_1 = -\overline{u'w'} \frac{dU}{dZ}$ — швидкість породження під дією усередненого зрушення швидкості і напруження Рейнольдса, яка апроксимується залежністю [2]:

$$\Pi_1 = \frac{W_*^3}{\chi Z}, \quad (4)$$

де W_* — динамічна швидкість вітру з врахуванням поверхневої напруги, м/с; Z — глибина, м; $\chi = 0,42$ — постійна Кармана.

Швидкість породження енергії турбулентності (Π_2) під дією зрушення хвильових складових і пульсацій хвиль, що перевертаються запишеться у вигляді [3]:

$$\Pi_2 = \Pi_{20} \exp(-kZ), \quad (5)$$

де $k = (2\pi/\lambda_w)$ — хвилеве число; λ_w — довжина хвильових збурень. Швидкість породження енергії турбулентності на вільній поверхні Π_{20} , де процес перекидання хвиль обумовлює потік енергії виражається залежністю [2]:

$$\Pi_{20} = \frac{C_w W_*^2}{\chi Z_0}, \quad (6)$$

де C_w — фазова швидкість перекидання хвиль; Z_0 — деякий масштаб, що визначається розмірами вихорів, які утворюються при перекиданні хвиль.

На підставі викладеного вище, апроксимуємо член Π рівняння (2) у вигляді:

$$\Pi = \frac{W_*^3}{\chi Z} \left(1 + \frac{C_w}{W_*} \exp(-k_0 Z) \right), \quad (7)$$

де $k_* = k_1 k$; $k_1 = 3$ — емпіричний коефіцієнт, значення якого набуто з умови сумірності темпу падіння швидкостей породження і дисипації по глибині.

Робота проти сил плавучості обумовлена вертикальною температурною неоднорідністю в поверхневому шарі водоймища. В області терокліну найбільш виражена вертикальна температурна неоднорідність в той час, як в шарі вітрового перемішування (епілімніону) має місце практично однорідний розподіл температур (рис. 1).

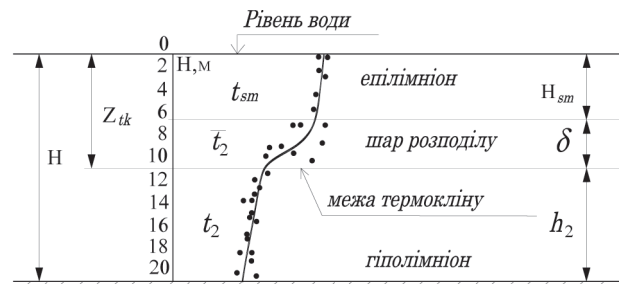


Рис. 1. Схема характерного профілю розподілу температур по вертикалі в стратифікованому потоці

Швидкість перенесення кінетичної турбулентної енергії під дією сил плавучості (B) визначиться по залежності [4]:

$$B = -g\beta K_T \frac{\partial \bar{t}}{\partial Z}, \quad (8)$$

де β — коефіцієнт об'ємного розширення; g — гравітаційне прискорення; $\partial \bar{t}/\partial Z$ — вертикальний градієнт температур.

K_T — коефіцієнт турбулентної температуропровідності, який можна виразити з допомогою залежності на основі теорії подібності [5]:

$$K_T = \frac{K_m}{Pr_t (1 + \sigma Ri)}, \quad (9)$$

де Ri — число Річардсона, що є параметром густинної стратифікації потоку, виражається залежністю:

$$Ri = g\beta \frac{\partial \bar{t}}{\partial Z} / \left(\frac{\partial U}{\partial Z} \right)^2 = g\beta \frac{\partial \bar{t}}{\partial Z} / \left(\frac{W_*}{Z\chi} \right)^2, \quad (10)$$

$Pr_t = 1,0$ – турбулентне число Прандтля для розвиненої турбулентності; $Pr_t = K_m/K_T$; K_m – коефіцієнт турбулентного обміну імпульсів при нейтральній стратифікації.

$$K_m = W * Z \chi. \tag{11}$$

З урахуванням вищевказаних складових, швидкість перенесення кінетичної турбулентної енергії під впливом сил плавучості виразиться залежністю:

$$B = - \frac{W_*^3}{\chi Z} \frac{Ri}{(1 + \sigma Ri)}, \tag{12}$$

Швидкість дисипації (D) кінетичної енергії турбулентності в умовах хвиль, що перекидаються, на підставі теоретичних досліджень [4], оцінюється залежністю:

$$D = \gamma \frac{C_w^3}{\lambda_w} \left(\frac{h_w}{\lambda_w} \right)^3 \exp \left(- \frac{6\pi Z}{\lambda_w} \right), \tag{13}$$

де $\gamma = 1$ – емпіричний коефіцієнт; h_w – середня висота вітрових хвиль, яка визначається в залежності від довжини розгону хвиль (L) і швидкості вітру (W).

З урахуванням приведених вище апроксимацій для П, В, D і, підставивши $Z = H_{sm}$ у рівняння (2), отримаємо залежність, що оцінює товщину шару вітрового перемішування [6]:

$$H_{sm} = \frac{\lambda_w}{\chi \gamma} \left(\frac{W_*}{C_w} \right)^3 \left(\frac{\lambda_w}{h_w} \right)^3 \times \left(1 + \frac{C_w}{W_*} \exp \left(- \frac{6\pi H_{sm}}{\lambda_w} \right) \right) \exp \left(\frac{6\pi H_{sm}}{\lambda_w} \right), \text{ м.} \tag{14}$$

Рівняння (14) є трансцендентним і вирішується чисельними методами. Чисельна реалізація залежності (14) представлена графічно у вигляді функціональних залежностей $H_{sm} = f(W;L)$ і $\lambda_w = f(W;L)$ на рис. 2 і 3. Значення параметрів хвиль рекомендується визначати по залежностях, приведених в [7].

Глибина залягання термокліну в ближній зоні водосховища-охолоджувача, з урахуванням товщини шару вітрового перемішування (рис. 1), визначиться за залежністю:

$$Z_{tk} = H_{sm} + \delta, \text{ м,} \tag{15}$$

де δ – товщина шару розділу при двошаровій стратифікації. В результаті обробки експериментальних даних [6], отримані емпіричні залежності для визначення величини δ .

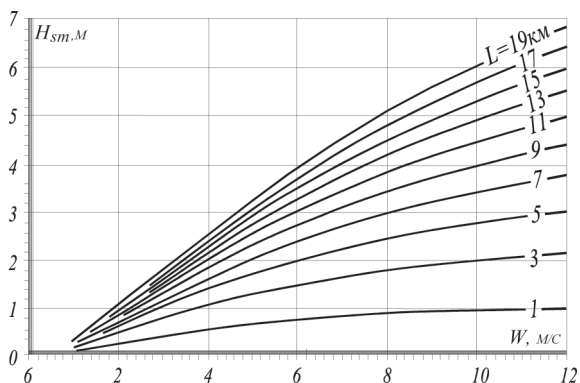


Рис. 2. Залежність глибини вітрового перемішування H_{sm} від швидкості вітру W і довжини розгону хвиль L для глибоководних водосховищ-охолоджувачів

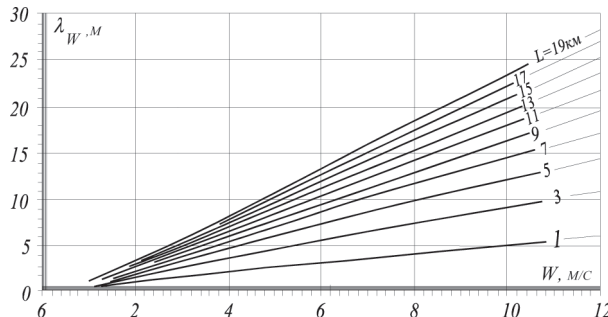


Рис. 3. Залежність довжини вітрових хвиль від швидкості вітру W і довжини розгону хвиль L для глибоководних водосховищ-охолоджувачів

- $\delta = 0,20 \text{ м}$ – при $(\Delta\rho/\rho_2) < 0,002$;
- $\delta = 0,11 \text{ м}$ – при $(\Delta\rho/\rho_2) > 0,013$;
- $\delta = H [\exp(-0,3575 \ln(\Delta\rho/\rho_2) - 3,8222)]$, м – при $0,002 < (\Delta\rho/\rho_2) < 0,013$.

Дослідження показали, що глибина вітрового перемішування в значній мірі залежить від довжини розгону хвиль: при швидкості вітру $W = 1-20 \text{ м/с}$ і довжині розгону хвиль $L = 1 \text{ км}$ зміна глибини вітрового перемішування (H_{sm}) змінюється від 0 до 1 м (при максимальній швидкості вітру 10 м/с), а потім вона стабілізується. При збільшенні довжини розгону хвиль відбувається різке збільшення глибини перемішування: при $L = 7 \text{ км}$ і швидкості вітру $W = 5 \text{ м/с}$ – $H_{sm} = 2,0 \text{ м}$; при $L = 19 \text{ км}$ і $W = 5 \text{ м/с}$ – $H_{sm} = 3,2 \text{ м}$.

Висновки

При визначенні товщини шару вітрового перемішування на водоймищах-охолоджувачах облік довжини розгону хвиль обов'язковий [6].

Приведені графіки зручні для практичного вживання і дозволяють для розрахункової швидкості вітру і довжини розгону хвиль оцінити товщину шару вітрового перемішування і, відповідно, глибину залягання термокліну, тобто визначити можливість вживання водовипуску з водозабором поєднаного типу в глибоководному водоймищі-охолоджувачі.

Література

1. Монин А. С. Статическая гидромеханика [Текст] / А. С. Монин, А. М. Яглом. – М.: Наука, 1965. – 639 с.
2. Филипс О. М. Динамика верхнего слоя океана [Текст] / О. М. Филипс. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 319 с.
3. Бенилов А. Ю. Физика атмосферы и океана [Текст]. Т. 5. Экспериментальные данные о мелкомасштабной морской турбулентности / А. Ю. Бенилов. – изд. АН СССР, 1969. – С. 513–532.
4. Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология [Текст] / Б. Хендерсон-Селлерс. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 336 с.
5. Макаров И. И. Моделирование гидротермических процессов водохранилищ-охладителей ТЭС и АЭС [Текст] / И. И. Макаров, А. С. Соколов, С. Г. Шульман. – Л.: Энергоиздат, 1986. – 181 с.

6. Антонова Л. Н. Водозаборно-водовыпускные сооружения совмещенного типа на водохранилищах-охладителях ТЭС и АЭС [Текст] : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Л. Н. Антонова. — Харьков : ХГТУСиА, 1996. — 132 с.
7. Лаппо Д. Д. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения [Текст] / Д. Д. Лаппо, С. С. Стрекалов, В. К. Завьялов. — Л. : ВНИИГ, 1990. — 432 с.

На базі системи диференціальних рівнянь тепломасообміну в скруберах отримано систему лінійних алгебраїчних рівнянь з чотирма невідомими. Система рівнянь дає якісну оцінку протікання процесу політропного охолодження і зволоження повітря у скруберах.

Ключові слова: тепломасообмін, скрубер, вологе повітря.

На базе системы дифференциальных уравнений тепломассообмена в скруберах получена система линейных алгебраических уравнений с четырьмя неизвестными. Система уравнений дает качественную оценку протекания процесса политропный охлаждения и увлажнения воздуха в скруберах.

Ключевые слова: тепломассообмен, скрубер, влажный воздух.

On the basis of differential equations of heat-mass exchange in the scrubber have got the system of linear algebraic equations with four unknowns. The system of equations gives a qualitative evaluation of a process polytropic cooling and humidifying the air in the scrubber.

Keywords: heat-mass exchange, scrubber, air.

УДК 536.27

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОНОСІЇВ У СКРУБЕРНИХ ПРОЦЕСАХ

І. М. Кузьменко

Кандидат технічних наук, доцент*

Контактний тел.: 068-375-79-43

E-mail: ozirno@ukr.net

М. В. Ногін

Кандидат фізико-математичних наук, доцент*

Контактний тел.: 097-277-23-90

О. О. Крячок

Кандидат технічних наук, доцент*

Контактний тел.: 068-363-70-00

E-mail: kryachok@apeps.kpi.ua

Т. Л. Зоуля

Магістрант*

Контактний тел.: 066-205-53-84

E-mail: zya_zya@ua.fm

*Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів та систем

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, корпус 5, м. Київ, 03056

1. Вступ

Для вологої очистки відпрацьованих газів від пилу та зниження їх температури застосовують скрубери. Наприклад, у доменному виробництві, на сміттєспалювальних заводах та ін. Конструктивно скрубери з насадками мають ряд переваг. Зокрема, вони можуть працювати в плівковому або барботажному режимах. Проте, на даний час не існує прийнятної методики розрахунку насадкових скрубєрів, оскільки в апараті протікають одночасно процеси зволоження, нагрівання (охолодження), які залежать від параметрів теплоносіїв. Саме тому задача розробки методики розрахунку скрубєрів є важливою та актуальною.

2. Постановка проблеми

Робота виконується у відповідності до теми 0111U006241 «Методи розрахунків та моделювання енергозберігаючого обладнання». Для розробки методів було вивчено кілька варіантів моделей, що описують

процеси в скрубєрах [1–5]. Проте, існуючі методи розрахунків ґрунтуються на вирішенні системи диференціальних рівнянь, що потребує чисельного розв'язання. Це значно ускладнює процес розрахунку кінцевих параметрів при протіканні процесів зволоження та охолодження газу в скрубєрах. Тому метою роботи є розробка прийнятної методики розрахунку скрубєрів як контактних апаратів. У роботі розглянуто постановку задачі у вигляді системи диференціальних рівнянь та отримано її аналітичний розв'язок [4–5].

3. Методика розрахунку

З поміж напівемпіричних способів розрахунку контактних апаратів розглянемо модель протитокового контактного підігрівача рідини зі зрошуваною регулярною насадкою [4]. Така математична модель описує процеси переносу тепла в плівці води, між плівкою води та повітрям і маси пари між плівкою води й повітрям.

Оскільки рівняння моделі описують протитоковий рух у контактному апараті, граничні умови задано на