

УДК 621.175.3:627.81

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕЖДУ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ И АТМОСФЕРОЙ В ВОДОЕМАХ-ОХЛАДИТЕЛЯХ

Е. И. НИКИФОРОВИЧ, А. Г. КОСТИН, В. Н. ДОМАНОВ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 22.11.2001

Исследуется тепловой режим водоема-охладителя тепловых и атомных электростанций. Представлен метод теплового расчета водоемов-охладителей, учитывающий влияние в широком диапазоне плотностной стратификации приводного слоя, трансформацию скорости ветра, температуры и влажности воздуха. Предлагаются новые, нелинейные зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи испарением. Для ряда действующих водоемов-охладителей проведены сопоставления расчетов температуры охлажденной воды по предложенному методу и методам других авторов.

Досліджується тепловий режим водоймищ-охолоджувачів теплових і атомних електростанцій. Представлений метод теплового розрахунку водоймищ-охолоджувачів, який враховує вплив у широкому діапазоні густинної стратифікації приводного шару, трансформацію швидкості вітру, температури і вологості повітря. Пропонуються нові, нелінійні залежності для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі випаровуванням. Для ряду діючих водоймищ-охолоджувачів здійснені порівняння розрахунків температури охолодженої води за запропонованим методом і методами інших авторів.

The results of investigations of the thermal regime of heat and nuclear power stations cooling ponds are presented. The new method of thermal design of cooling ponds taking into account the influence of thermal stratification of surface layer, transformation of wind velocity, temperature and humidity of air and nonlinear correlations for the evaporation heat transfer coefficient are suggested. For some operating cooling ponds the comparison of different calculation's methods of temperature of water was made.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время выработка электроэнергии осуществляется в основном на крупных тепловых и атомных электростанциях. Ввиду необходимости отвода в окружающую среду огромного количества тепла, составляющего около 70% энергии топлива, расходы воды, охлаждающей конденсаторы турбин, достигают 100–200 м³/с, что соответствует расходам довольно крупных рек. Значительное количество электростанций базируется на водоемах-охладителях, имеющих, по сравнению с другими типами охладителей, лучшие технико-экономические показатели. Ввиду существенного влияния температуры поступающей в конденсаторы турбин станции охлажденной воды на экономические показатели электростанции и значительных капитальных вложений в оборотные системы охлаждения с водоемами-охладителями требуется тщательный учет всех факторов, влияющих на охлаждающую способность этих водоемов. В то же время, малые перепады температур воды в конденсаторах турбин (8–10⁰С) при огромном количестве сбрасываемого в водоемы тепла и влияние на охлаждающую способность водоемов мно-

гих факторов затрудняет точное прогнозирование гидротермического режима и температуры охлажденной воды в водоеме. Кроме того, используемые водоемы-охладители должны удовлетворять требованиям охраны окружающей среды. Однако действующие в настоящее время методы теплового расчета водоемов-охладителей не позволяют с достаточной точностью и надежностью прогнозировать гидротермический режим водоемов-охладителей и температуры охлажденной воды. В данной работе приводится новый метод теплового расчета водоемов-охладителей, более полно учитывающий, по сравнению с существующими методами, влияние плотностной стратификации в приводном слое водоема, трансформацию воздушного потока над водоемом и ряд других факторов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Установлено, что при переходе воздушной массы с сильно шероховатой поверхности суши на значительно более гладкую водную поверхность на линии раздела скачкообразно меняются условия обтекания подстилающей поверхности. Над поверхностью водоема изменяется скорость ветра,

стратифікація температури і вологості повітря. Благодаря змінам шероховатості і стратифікації трансформуються профілі цих параметрів повітряного потоку, в результаті чого зростають середня швидкість вітру і вологість приводного шару, а над підігріваемими водоймами – і температура повітря. По порівнянню з сушею, над водною поверхністю значно зростають потоки водяного пару. Над поверхністю водойми формується внутрішній (по відношенню до пограничного шару атмосфери) пограничний шар повітря.

В основу методу теплового розрахунку водойми покладено визначення характеристик внутрішнього пограничного шару – товщини пограничного шару, профілів швидкості вітру, коефіцієнтів опору, обміну і др.

Для розрахунку динамічних характеристик внутрішнього пограничного шару використано рівняння імпульсів, яке отримується з рівняння руху за допомогою інтегрування по товщині пограничного шару. Розглядаємо потік повітря над водоймом, як потік над плоскою поверхністю. Тоді, ігноруючи продольний градієнт тиску в рівнянні руху, рівняння імпульсів можна записати в вигляді [1,2]

$$\frac{d}{dx} \int_0^h u(U-u)dy = \frac{\tau_0}{\rho} - \frac{\tau_h}{\rho}. \quad (1)$$

Здесь x – відстань по довжині розгона повітряного потоку від урізового створу до розгляданого перерізу над поверхністю водойми; y – вертикальна координата; h – товщина пограничного шару; u – швидкість повітряного потоку всередині пограничного шару; U – швидкість на верхній межі пограничного шару; τ_0 – касателне напруження на водній поверхності; τ_h – касателне напруження на верхній межі пограничного шару; ρ – густина повітряного потоку.

Приймаються наступні граничні умови.

Швидкість U набегаючого повітряного потоку береться по переважаючому напрямку вітру постійною по ширині водойми, крім того, швидкість потоку на верхній межі пограничного шару приймається рівною швидкості вітру в урізовому створі на тій же висоті.

В урізовому створі $x_0 = 0$, $U_0 = 0$. Швидкість вітру на водній поверхності $u_0 = 0$.

Граничні умови на верхній межі пограничного шару $y = h$ будуть: $U_h = u_h$; $\theta_h = \theta_0$; $e_h = e_0$. Здесь u_h – швидкість повітряного потоку на верхній межі пограничного шару; θ_h і θ_0 – відповідно температура повітря на верхній

межі пограничного шару і в урізовому створі; e_h і e_0 – відповідно вологість повітря (пружність водяного пару) на верхній межі пограничного шару і в урізовому створі.

Параметр шероховатості суши Δ приймається середньваженим по контуру водойми, внаслідок чого плоска задача розрахунку пограничного шару косвенним чином враховує просторовий характер обтікання реального водойми.

2. МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПОГРАНИЧНОГО ШАРУ

Многочисленними лабораторними і натурними дослідженнями встановлено, що над водною поверхністю в внутрішньому пограничному шарі існує лінійний підшар, переходящий в турбулентний шар з близьким до логарифмічному розподілом швидкостей [2–5]. Профілі швидкостей u всередині пограничного шару виражаємо для лінійного і логарифмічного ділянок залежностями модифікованої двохшарної моделі турбулентного пристінного течія, запропонованої І.К.Никитиным [2], а саме:

$$0 \leq \frac{y}{\delta} \leq 1, \quad u = u_{*\delta} Re_{*\delta} \frac{y}{\delta}; \quad (2)$$

$$1 \leq \frac{y}{\delta} \leq \frac{h}{\delta},$$

$$u = u_{*\delta} Re_{*\delta} (1,15 lg \frac{y}{\delta} + 1,5 - 0,5 \frac{\delta}{y}), \quad (3)$$

де $u_{*\delta}$ – динамічна швидкість; δ – товщина лінійного підшару; $Re_{*\delta}$ – коефіцієнт пропорційності, визначаючий товщину лінійного підшару і являючийся параметром, характеризуючим вплив сил плавучості на структуру потоку.

Після підстановки залежностей (2) і (3) в рівняння (1) і виконання операцій інтегрування по y і x отримуємо

$$\frac{\int_0^x \left(\frac{\tau_0}{\rho} - \frac{\tau_h}{\rho} \right) dx}{\frac{\tau_0}{\rho}} = f \left(\frac{h}{\delta}, \delta, Re_{*\delta} \right), \quad (4)$$

де

$$f \left(\frac{h}{\delta}, \delta, Re_{*\delta} \right) = \delta Re_{*\delta}^2 0,575 \left[\left(1 + \frac{h}{\delta} + \frac{\delta}{h} \right) lg \frac{h}{\delta} + 0,435 \left(\frac{h}{\delta} + 2 \frac{\delta}{h} \right) - 1,014 \right]. \quad (5)$$

В левой части уравнения (4) вместо $\frac{\tau_h}{\rho}$ используется эмпирическая следующая зависимость, полученная по результатам лабораторных исследований [2]:

$$\frac{\tau_h}{\rho} = 0,5 \frac{\tau_0}{\rho} \left(1 - \frac{h}{H_0}\right), \quad (6)$$

(где H_0 – высота градиентного приземного слоя, составляющего обычно 150–200 м). Выполнение численного интегрирования дает искомые значения расстояний x_i от урезового створа по длине разгона воздушного потока над акваторией подогреваемого водоема:

$$x_1 = \frac{2f_1}{a_1} \quad \text{при } i = 1; \quad (7)$$

$$x_i = x_{i-1} + 2 \frac{u_{* \delta i}^2 f_i - u_{* \delta i-1}^2 f_{i-1}}{a_i u_{* \delta i}^2 - a_{i-1} u_{* \delta i-1}^2} \quad \text{при } i \geq 2. \quad (8)$$

Здесь

$$a_i = 1 - 0,5 \left(1 - \frac{h}{H_0}\right); \quad (9)$$

f_i – функция, определяемая зависимостью (5).

3. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Расчет внутреннего пограничного слоя над водоемом проводится в следующей последовательности [6]. Скорость ветра в урезовом створе водоема в преобладающем направлении по длине разгона над водной поверхностью определяется с использованием графика статистической связи между скоростями ветра u_Φ , измеренными на ближайшей метеостанции, принятой в качестве опорной, и скоростями ветра $u_{\Phi 0}$ в урезовом створе водоема-охладителя на высоте флюгера метеостанции, т. е. $u_{\Phi 0}/u_\Phi = f(u_\Phi)$ [2] (рис. 1). Принимая в зависимости (3) значения $y = h_\Phi$, $u = u_{\Phi 0} = u_\Phi \cdot f(u_\Phi)$; $\delta = \Delta$, а также $Re_{* \delta 0} \simeq 5,6$ (что соответствует близкой к нейтральной стратификации воздуха), определяем для заданной расчетной скорости величину $u_{* \delta 0}$. Тогда профиль скоростей в урезовом створе можно представить с помощью зависимостей (2) и (3). Температура θ_0 и упругость водяного пара ϵ_0 в урезовом створе принимаются по измерениям на опорной метеостанции (на высоте 2 м). Полагаем, что $U(y)$, θ_0 и ϵ_0 сохраняются без изменения при движении воздушного потока над внутренним пограничным слоем.

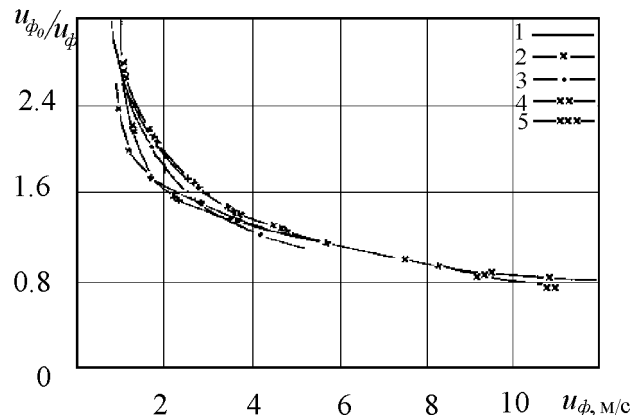


Рис. 1. Графики статистической связи $U_{\Phi 0}/U_\Phi = f(U_\Phi)$ между скоростями ветра U_Φ на высоте флюгера метеостанции и $U_{\Phi 0}$ в урезовом створе водоемов-охладителей: 1 – Чернобыльской АЭС; 2 – Запорожской АЭС; 3 – проектируемой Крымской АЭС; 4 – района промплощадки Ровенской АЭС; 5 – Южно-Украинской АЭС

Задаваясь рядом возрастающих высот пограничного слоя h_i по длине разгона воздушного потока над водоемом для найденных в урезовом створе значений $u_{* \delta 0}$ и принятых Δ и $Re_{* \delta 0}$, определяем на верхней границе пограничного слоя по зависимостям (2) и (3) значения скоростей u_{0h_i} .

Для заданных значений h_i расстояния x_i от урезового створа определяются по зависимостям (7) и (8), для нахождения параметров которых используется безразмерное поле поверхностных изотерм водоема-охладителя, соответствующее безразмерной кривой падения температуры воды $\frac{t_i - t_2}{\Delta t_b} = f\left(\frac{\Sigma \omega_i}{\Omega}\right)$ в поверхностном слое по длине циркуляционного потока от водовыпуска до водозабора, являющейся характеристикой гидротермического режима водоема-охладителя. Здесь t_i – температура воды на i -й поверхностной изотерме; t_2 – температура охлажденной воды на водозаборе; ω_i – площади водной поверхности между изотермами; Ω – площадь водоема-охладителя в зоне подогрева; Δt_b – перепад температур в водоеме-охладителе между водовыпуском и водозабором.

Следует отметить, что если используется система технического водоснабжения водоема-охладителя с коротким водовыпускным каналом, то потерями тепла в нем можно пренебречь, и перепад температур в водоеме Δt_b принимается равным перепаду температур в конденсаторах турбин Δt . В водовыпускных каналах значительной длины происходит снижение температуры воды, которое при выборе поля изотерм предваритель-

но рассчитывается по принимаемым ниже формулам, а затем уточняется при выполнении теплового расчета водоема.

Кривая падения может быть получена путем гидротермического моделирования водоема-охладителя, а также принята по данным натурных исследований водоемов-охладителей, сходных с рассчитываемым по конфигурации, компоновке гидросооружений и типу водовыпускных сооружений.

С помощью этой кривой падения можно получить в первом приближении среднюю поверхностную температуру воды водоема-охладителя $t_{п}$.

Затем определяем для принятых i -сечений внутреннего пограничного слоя локальные значения чисел Ричардсона:

$$Ri_i = -\frac{gh_i \Delta\rho}{u_{hi}^2 \rho}, \quad (10)$$

где g – ускорение силы тяжести; $\Delta\rho$ – разность плотностей воздушного потока у поверхности воды и на верхней границе пограничного слоя.

Плотность воздуха определяется по формуле

$$\rho = \left(\frac{P - e}{29,27} + \frac{e}{47,06} \right) \frac{10^4}{735,6 \cdot \theta_h}, \quad (11)$$

где P – атмосферное давление, гПа; θ_h – температура воздуха, К.

По найденным значениям Ri_i определяем параметр $Re_{*\delta}$ с помощью зависимостей $Re_{*\delta} = f(Ri)$, экспериментально установленных лабораторными и натурными измерениями [2] и аппроксимированных формулами

$$\begin{aligned} Re_{*\delta} &= 50Ri + 5,5 \\ \text{при} \quad &-0,025 \leq Ri < 0; \\ Re_{*\delta} &= 3,2794 - 0,02427/Ri \\ \text{при} \quad &-0,11 \leq Ri < -0,25; \\ Re_{*\delta} &= 0,562Ri + 3,562 \\ \text{при} \quad &-1,0 \leq Ri < -0,11; \\ Re_{*\delta} &= 2,81 - \frac{0,4437}{Ri} + 0,255Ri \\ \text{при} \quad &-4,0 \leq Ri < -1,0; \\ Re_{*\delta} &= 1,21 - \frac{3,112}{Ri} + 0,022Ri \\ \text{при} \quad &-10,0 \leq Ri < -4,0; \\ Re_{*\delta} &= 0,0375Ri + 1,675 \quad \text{при} \quad Ri \leq -10,0; \\ Re_{*\delta} &= 114,286Ri + 5,5 \quad \text{при} \quad 0 \leq Ri < 0,035; \end{aligned} \quad (12)$$

$$Re_{*\delta} = 8Ri + 9,22 \quad \text{при} \quad 0,035 \leq Ri < 0,16;$$

$$Re_{*\delta} = 10,5 \quad \text{при} \quad Ri \geq 0,16.$$

В выбранных сечениях определяем значения динамической скорости $u_{*\delta i}$ и толщины линейного подслоя δ_i совместным решением уравнения профиля скорости (3), применительно к i -му сечению и экспериментальной зависимости [2]

$$\delta = Re_{*\delta} \cdot 0,000015/u_{*\delta} \quad \text{при} \quad 0 \leq u_{*\delta} < 0,08445;$$

$$\delta = 0,001Re_{*\delta} (0,169105 + 0,1373u_{*\delta} - 1,40296u_{*\delta}^2 + 11,194u_{*\delta}^3) \quad \text{при} \quad u_{*\delta} \geq 0,08445, \quad (13)$$

которая учитывает подвижную шероховатость волновой водной поверхности, поэтому значение локальных коэффициентов сопротивления водной поверхности можно определить по формуле

$$C'_{fi} = \frac{2u_{*\delta i}^2}{u_{hi}^2}. \quad (14)$$

По найденным параметрам $Re_{*\delta}$ и δ_i с помощью зависимости (5) определяем значения $f(\frac{h}{\delta}, \delta, Re_{*\delta})_i$ и по формуле (9) – значения a_i .

Имея значения $f_i, u_{*\delta i}$ и a_i , можно по зависимостям (7) и (8) определить расстояния x_i от урезного створа, соответствующие сечениям с заданными выше высотами пограничного слоя h_i .

4. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТЕПЛОМАССОБМЕНА ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ С АТМОСФЕРОЙ

Тепловой расчет водоема выполняется на основе полученных характеристик внутреннего пограничного слоя над водной поверхностью водоема-охладителя [7], согласно разделу 3.

Тепловой режим водоемов-охладителей определяется балансом тепла. Количество тепла, поступающее в водоем от электростанции и солнечной радиации, равно при установившихся условиях количеству тепла, теряемого водоемом за счет теплоотдачи с поверхности водоема в атмосферу путем испарения, конвекции и излучения. В проточных водоемах учитывается приход и расход тепла за счет проточности. Теплоотдача в грунт ложа водоема за счет фильтрации, осадков и др. не учитывается ввиду ее малости.

Для общего случая нестационарного теплового режима водоема-охладителя уравнение теплового баланса для водоема в целом можно представить в виде

$$\frac{\Delta S}{\Omega} + R = \frac{Q_{t\Sigma}}{\Omega} + H_{cp} \rho c \frac{dt_v}{d\tau}. \quad (15)$$

Здесь $\Delta S/\Omega = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta t_{\text{в}}/\Omega$ – удельная тепловая нагрузка на водоем от электростанции ($\text{Вт}/\text{м}^2$); c – удельная теплоемкость воды ($\text{Дж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$); ρ – плотность воды ($\text{кг}/\text{м}^3$); Q – циркуляционный расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$); R – радиационный баланс водоема ($\text{Вт}/\text{м}^2$); $Q_{t\Sigma}$ – суммарная теплоотдача испарением и конвекцией ($\text{Вт}/\text{м}^2$); $H_{\text{ср}} \rho c \frac{dt_{\text{в}}}{d\tau}$ – изменение теплосодержания водоема за расчетный период ($\text{Вт}/\text{м}^2$); $H_{\text{ср}}$ – средняя глубина водоема (м); $t_{\text{в}}$ – средняя температура водной массы водоема ($^\circ\text{C}$); τ – расчетный период в сутках.

Для выполнения теплового расчета необходимы следующие исходные данные:

– метеорологические величины, измеренные на ближайшей к водоему метеостанции: температура воздуха θ ($^\circ\text{C}$), упругость водяного пара e (гПа); скорость ветра на высоте флюгера $u_{\text{ф}}$ (м/с); общая облачность n в баллах; географическая широта φ расположения электростанции (град.с.ш.); P – атмосферное давление (гПа);

– мощность электростанции N (МВт) и соответствующие ей циркуляционный расход воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$) и перепад температур в конденсаторах турбин Δt ($^\circ\text{C}$);

– распределение по поверхности водоема безразмерных температур воды $\frac{t_i - t_2}{\Delta t_{\text{в}}}$, соответствующее принятой выше кривой падения температуры $\frac{t_i - t_2}{\Delta t_{\text{в}}} = f\left(\frac{\Sigma \omega_i}{\Omega}\right)$.

План поверхностных изотерм водоема разбивается на j элементов поверхности ($j = 1 \div m$) с площадями ω_j , температурами $t_{\text{п}j}$, и для каждого из них находятся расстояния x_j от уреза воды до центра тяжести элемента по расчетному направлению ветра.

Для найденных значений x_j определяем соответствующие j -м элементам полученные расчетом пограничного слоя величины h_j, u_{hj}, δ_j и C'_{fj} (см. раздел 3). По формуле (10) определяем для каждого элемента уточненные значения R_{ij} , а затем по зависимостям (12) – локальные значения $Re_{*\delta j}$.

Суммарную теплоотдачу испарением и конвекцией с каждого элемента ω_j определяем по зависимости [2]

$$Q_{t\Sigma j} = L_j (1 + B_j) St_{\text{Д}j} (C_{\text{п}j} - C_h) u_{hj} \cdot \omega_j. \quad (16)$$

Здесь L_j – скрытая теплота испарения ($\text{Дж}/\text{кг}$); B_j – отношение Боуэна; $St_{\text{Д}j}$ – число Стэнтона диффузионное; $C_{\text{п}j}$ и C_h – соответственно концентрация водяного пара у поверхности воды и на верхней границе пограничного слоя ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Скрытая теплота испарения L_j определяется по

формуле

$$L_j = 4,1868(597,2 - 0,56t_{\text{п}j}). \quad (17)$$

Отношение Боуэна имеет вид

$$B_j = \frac{C_p \rho}{L_j} \frac{t_{\text{п}j} - \theta_h}{C_{\text{п}j} - C_h} \frac{\alpha_t}{\alpha_e}, \quad (18)$$

где θ_h – температура воздуха на верхней границе пограничного слоя h ($^\circ\text{C}$); ρ – плотность воздуха на высоте h ($\text{кг}/\text{м}^3$); C_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$; отношение коэффициентов переноса тепла и влаги $\alpha_t/\alpha_e \simeq 0,97$.

Концентрация водяного пара C_h в воздухе выражается зависимостью

$$C_h = 0,622 \frac{e}{P - 0,378e} \rho, \quad (19)$$

причем локальное значение концентрации водяного пара у поверхности воды $C_{\text{п}j}$ также вычисляется по формуле (19), в которой вместо e принимается $e_{\text{п}j}$ – упругость водяного пара при температуре участка поверхности воды $t_{\text{п}j}$ [8].

Максимальная упругость водяного пара $e_{\text{п}}$ (гПа), соответствующая средней поверхностной температуре воды $t_{\text{п}}$ (в пределах $0 - 50^\circ\text{C}$), может быть определена по следующей зависимости:

$$e_{\text{п}} = 1,333(4,58 + 0,3278t_{\text{п}} + 0,01194t_{\text{п}}^2 + 0,0001153t_{\text{п}}^3 + 0,00000436t_{\text{п}}^4). \quad (20)$$

Число Стэнтона диффузионное $St_{\text{д}}$ выражается по зависимости, учитывающей влияние стратификации в пограничном слое, и имеет вид [9]

$$St_{\text{д}j} = \frac{\sqrt{C'_{fj}/2}}{Re_{*\delta j} (\lg \frac{h_j}{\delta_j} + 0,46) + \frac{30}{Re_{*\delta j}}}. \quad (21)$$

Тогда суммарная теплоотдача испарением и конвекцией со всех элементов ω_j будет

$$Q_{t\Sigma} = \sum_{j=1}^m Q_{t\Sigma j}. \quad (22)$$

Величина радиационного баланса водоема-охладителя определяется по формуле [10,11]

$$R = (Q + q)_n (1 - a) - I, \quad (23)$$

где $(Q + q)_n$ – суммарная солнечная радиация при общей облачности n ($\text{Вт}/\text{м}^2$); a – альbedo водной поверхности ($\text{Вт}/\text{м}^2$); I – эффективное излучение,

т. е. разность между собственным излучением водной поверхности и поглощенной ею частью встречного излучения атмосферы ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Величина $(Q + q)_n$ определяется зависимостью

$$(Q + q)_n = (Q + q)_0 [1 - (1 - K_\varphi)n]. \quad (24)$$

Здесь $(Q + q)_0$ – суммарная солнечная радиация при безоблачном небе; K_φ – коэффициент, учитывающий широту месторасположения водоема. Величина $(Q + q)_0$ зависит от географической широты, времени года, прозрачности атмосферы и альбедо поверхности. На наш взгляд, наиболее удовлетворительные значения $(Q + q)_0$ на территории Украины содержатся в работах Н.И. Гойсы [12].

Величина эффективного излучения водной поверхности I ($\text{Вт}/\text{м}^2$) определяется по формуле Н. А. Ефимовой [13]

$$I = 48,458 [1,065 \cdot 10^{-9} T^4 (0,254 - 0,005 \cdot e_n) \times \\ \times (1 - C_n \cdot n) + 4,25 \cdot 10^{-9} T^3 (t_{пj} - \theta_h)]. \quad (25)$$

Здесь T – температура воздуха, K ; C_n – коэффициент, учитывающий влияние облачности на излучение.

Входящие в формулы (23)-(25) значения a , K_φ , C_n могут быть приняты по таблицам, приведенным в МР-76 [10].

Тепловой расчет водоема-охладителя проводится с помощью уравнения (15), которое решается путем итерации относительно удельных тепловых нагрузок на водоем.

В процессе решения уравнения теплового баланса выполняется расчет снижения температуры воды в водовыпускном канале (в случае его значительной длины) путем испарения, конвекции и излучения. В результате расчета определяется температура воды на водовыпуске t_1 и перепад температур в водоеме-охладителе между водовыпуском и водозабором Δt_v , который вносится в уравнение теплового баланса. Расчет повторяется до достижения заданной точности между левой и правой частями уравнения теплового баланса.

В результате расчета находятся искомые значения локальных температур $t_{пj}$ и температура охлажденной в водоеме воды t_2 в зависимости от метеоусловий и тепловой нагрузки от электростанции.

Следует отметить, что приведенный метод достаточно сложен для использования в инженерной практике, поэтому в Институте гидромеханики НАН Украины разработан новый инженерный метод теплового расчета водоемов-охладителей, который сравнительно прост для практического ис-

пользования и не уступает по точности приведенному выше. Новый метод теплового расчета разработан с использованием данных натуральных и лабораторных исследований различных авторов, а также расчетных исследований по приведенному выше методу.

5. МЕТОД ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА ВОДОЕМОВ-ОХЛАДИТЕЛЕЙ

В основу метода теплового расчета водоема-охладителя положено уравнение теплового баланса, записанное для его водной массы. Для нестационарных условий оно может быть выражено в виде, использованном в ряде нормативных документов [10]:

$$\frac{\Delta S}{\Omega} = \alpha_n (e_n - e_2) + \alpha_k (t_n - \theta_2) - R + H_{cp} \rho c \frac{d\bar{t}_v}{d\tau}, \quad (26)$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи испарением ($\text{Вт}/\text{м}^2$); $\alpha_k = 0,48\alpha_n$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией ($\text{Вт}/\text{м}^2$); e_2 – упругость водяного пара на высоте 2 м над водной поверхностью (гПа); θ_2 – температура воздуха на высоте 2 м над водной поверхностью ($^\circ\text{C}$).

При этом изменение теплосодержания водоема за счет осадков, теплоотдачи в грунт и фильтрации также, как и ранее, не учитывается ввиду их весьма малого влияния.

Основной задачей метода является возможно более точное определение простыми зависимостями составляющих уравнения теплового баланса, поскольку от этого зависит точность результатов теплового расчета, заключающаяся в определении средней температуры водной поверхности и температуры охлажденной воды. Точность определения составляющих уравнения теплового баланса зависит, в свою очередь, от качества исходных данных.

Исходными данными для теплового расчета служат:

- 1) температура воздуха;
- 2) упругость водяного пара;
- 3) скорость ветра;
- 4) данные о направлении господствующих ветров;
- 5) общая облачность и другие данные для расчета радиационного баланса;
- 6) величина циркуляционного расхода охлаждающей воды;
- 7) перепад температур в конденсаторах электростанции;

8) топографические и компоновочные данные о рассчитываемом водоеме.

Приведенные в п.п. 1-5 метеорологические данные как правило принимаются по наблюдениям на ближайшей к водоему метеорологической станции, имеющей многолетний ряд наблюдений.

Согласно исследованиям, на результаты расчетов сильное влияние оказывает скорость ветра над водохранилищем u_2 , принимаемая в расчете как скорость ветра на высоте 2 м над водной поверхностью, осредненная на площади водоема.

Для определения скорости ветра u_2 предлагается использовать графики статистической связи между скоростями ветра u_Φ и скоростями ветра $u_{\Phi 0}$, т. е. $\frac{u_{\Phi 0}}{u_\Phi} = f(u_\Phi)$ (см. рис. 1).

Согласно результатам многочисленных натуральных измерений, осредненная по поверхности водоема расчетная скорость ветра u_2 составляет 0,9 от скорости $u_{\Phi 0}$ в урезном створе.

Для расчета температуры и влажности воздуха на высоте 2 м над водной поверхностью рекомендуется использовать следующие формулы [10, 14]:

$$\theta_2 = \theta' + (t_{\text{п}} - \theta')A. \quad (27)$$

$$e_2 = e' + (0,8e_{\text{п}} - e')A; \quad (28)$$

Здесь θ' и e' – соответственно температура воздуха и упругость водяного пара на высоте 2 м, измеренные на опорной метеостанции, ($^{\circ}\text{C}$, гПа); A – эмпирический коэффициент трансформации, зависящий от средней протяженности водного зеркала X_{cp} , (км), а также от разности температур водной поверхности и воздуха, измеренного на опорной метеостанции,

$$A = 1 - \exp[-(0,13 + B)(X_{cp} - 0,04)^{0,432}]. \quad (29)$$

Здесь

$$B = \frac{0,69 - 0,0344(\delta t + 10)^{1,3}}{[1 + 0,265(\delta t + 10)^{1,3}][1 + 0,09(X_{cp} - 0,04)^{0,76}]}; \quad (30)$$

$$\delta t = t_{\text{п}} - \theta'.$$

Зависимости (27)–(30) можно использовать при нейтральной и устойчивой стратификации приводного слоя атмосферы, а также в случае неустойчивой стратификации, если разность температур воды и воздуха не превышает 1–2 $^{\circ}\text{C}$.

Расчет влажности воздуха на высоте 2 м над водной поверхностью для водоемов-охладителей со значительной тепловой нагрузкой, когда перепад температур между водной поверхностью и воздухом превышает 2 $^{\circ}\text{C}$, рекомендуется вести по формуле

$$e_2 = e' + (e_{\text{п}} - e')A. \quad (31)$$

Расчет температуры воздуха θ_2 проводится по формуле (27) с откорректированным коэффициентом трансформации A . В этом случае в формулах (27) и (31) используется зависимость коэффициента A (29) с некоторыми изменениями выражения B , т. е.

$$B = \frac{0,69 - 0,02(\delta t + 10)^{1,3}}{[1 + 0,265(\delta t + 10)^{1,3}][1 + 0,09(X_{cp} - 0,04)^{0,76}]} \quad (32)$$

Величина радиационного баланса водоема-охладителя R определяется по формулам (23) и (24). Величина теплоотдачи с поверхности водоема в атмосферу эффективным излучением I входит в состав радиационного баланса R .

Величина эффективного излучения водной поверхности I определяется по формуле (25) Н. А. Ефимовой [13], где величины ϵ_h и θ_h заменены соответственно на ϵ_2 и θ_2 .

Одной из наиболее существенных величин в правой части уравнения теплового баланса (26) является коэффициент теплоотдачи испарением $\alpha_{\text{и}}$. Многими авторами предложено значительное число формул коэффициента $\alpha_{\text{и}}$, имеющих существенные различия между собой, что сказывалось на результатах тепловых расчетов водоемов-охладителей. Поэтому нами предложены новые, усовершенствованные зависимости коэффициента теплоотдачи испарением $\alpha_{\text{и}}$, полученные по данным натуральных и лабораторных исследований ряда водоемов-охладителей, а также путем использования расчетных исследований этих водоемов-охладителей при различных метеоусловиях и тепловых нагрузках, выполняемых на основе метода расчета внутреннего пограничного слоя [2, 6].

Эти зависимости $\alpha_{\text{и}}$ учитывают в широком диапазоне влияние плотностной стратификации приводного слоя атмосферы на интенсивность испарения, а также трансформации скорости ветра, температуры и влажности воздуха над поверхностью водоема.

При неустойчивой стратификации в приводном слое, когда температура водной поверхности $t_{\text{п}}$ выше температуры воздуха θ_2 , т. е. $\delta t = t_{\text{п}} - \theta_2 > 0$, для коэффициента $\alpha_{\text{и}}$ ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Па})$) предлагается следующая зависимость:

$$\alpha_{\text{и}} = \alpha_{\text{и},0} + F(u, \delta t). \quad (33)$$

Здесь $\alpha_{\text{и},0}$ – коэффициент теплоотдачи испарением при нейтральных условиях в приводном слое, т. е. $\delta t = 0$; δt – разность температур между водной поверхностью и воздухом на высоте 2 м; $F(u, \delta t)$ – коэффициент, учитывающий влияние стратификации в приводном слое, т. е. при

$\delta t > 0$.

При нейтральных условиях в приводном слое

$$\alpha_{и,0} = 0,363(0,13 + 0,0473u_2 + 0,00017u_2^2 + 0,000255u_2^3). \quad (34)$$

Для плотностной стратификации в приводном слое при $\delta t > 0$

$$F(u, \delta t) = 0,363(a_0 + a_1u_2 + a_2u_2^2), \quad (35)$$

где

$$a_0 = 0,0115\delta t - 0,00008\delta t^2; \quad (36)$$

$$a_1 = 0,00056\delta t + 0,000135\delta t^2 - 0,000056\delta t^3; \quad (37)$$

$$a_2 = 0,0008\delta t - 0,0000245\delta t^2. \quad (38)$$

Для $\delta t < 0$ ($t_n < \theta_2$), т. е. при устойчивой стратификации приводного слоя предлагается другая структура зависимости $\alpha_{и}$:

$$\alpha_{и} = \alpha_{и,0} \cdot F(\delta t), \quad (39)$$

где $\alpha_{и,0}$ определяется по формуле (34), а функция $F(\delta t)$ имеет вид

$$F(\delta t) = 1 + 0,108\delta t + 0,0102\delta t^2 + 0,000875\delta t^3. \quad (40)$$

После определения составляющих теплового баланса решение уравнения теплового баланса водоема-охладителя (26) ведется путем итераций относительно средней температуры водной поверхности водоема-охладителя t_n .

При этом температура воды на водовыпуске t_1 и перепад температур в водоеме-охладителе Δt_v определяются, как в разделе 4.

Для перехода от полученной в результате решения уравнения теплового баланса среднеповерхностной температуры t_n к температуре охлажденной воды t_2 , поступающей в конденсаторы турбин электростанции, обычно используется эмпирическая зависимость [15,16]

$$t_2 = t_n - \Pi_t \cdot \Delta t. \quad (41)$$

Для выбора параметра Π_t , характеризующего организацию циркуляционного потока в водоеме-охладителе и связанную с ней кривую падения температуры воды по оси транзитного потока, можно использовать план поверхностных изотерм, полученный путем гидротермического моделирования при соблюдении основных критериев подобия, или результаты натурных исследований водоемов-охладителей, имеющих сходство по конфигурации, глубине, а также компоновке гидротехнических сооружений с рассчитываемым водоемом. В случае прогнозного расчета гидротермического режима действующего водоема-охладителя параметр Π_t определяется по результатам натурных измерений.

6. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА РАСЧЕТА С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДАМИ ДРУГИХ АВТОРОВ

Эффективность предлагаемого метода теплового расчета апробировано на ряде водоемов-охладителей, где натурные исследования были выполнены в сравнительно полном объеме и содержали достаточное количество информации, необходимой для проведения расчетов. Для сопоставления использованы материалы натурных измерений гидротермического режима водоемов-охладителей Змиевской, Литовской и Заинской ГРЭС, а также Чернобыльской, Южно-Украинской и Курской АЭС. Результаты сопоставления по температуре охлажденной воды приведены в табл. 1, из которой видно, что полученная в результате расчетов по предложенному методу температура охлажденной воды t_2 отклоняется от измеренной в пределах от 0 до $0,5^\circ\text{C}$, что свидетельствует о высокой точности расчетов по сравнению с другими методами.

На рис. 2 представлены графики зависимости коэффициента теплоотдачи испарением $\alpha_{и}$ в функции от скорости ветра над водоемом u_2 и разности температур δt между водной поверхностью и воздухом в широком диапазоне скоростей ветра u_2 и δt [17].

Здесь в явном виде отражено влияние на величину $\alpha_{и}$ термической стратификации приводного слоя и скорости ветра, влияние же стратификации влажности выражено в неявном виде. Из рис. 2 следует, что зависимость $\alpha_{и}$ от скорости ветра u_2 и перепада температур воды и воздуха δt носит нелинейный характер, что подтверждается проведенными нами натурными исследованиями, а также исследованиями других авторов [16]. На рис. 2 для сравнения нанесены также значения $\alpha_{и}$, вычисленные по формулам других авторов. В частности, в виде прямой при любых значениях δt представлены $\alpha_{и}$, вычисленные по формулам Карпендера [10, 15] и Браславского [16], а также в виде прямых в интервале δt от -10°C до 10°C по формулам Браславского-Нургалиева [10–14] и Харлемана [18].

В табл. 1 представлено также сопоставление значений температур охлажденной воды t_2 , полученных по методам других авторов, вычисленных для тех же водоемов-охладителей, при тех же метеоусловиях и тепловых нагрузках, как и при выполнении расчетов по предлагаемому методу. Для сопоставления использованы МР-76

Табл. 1. Сопоставление результатов расчетов температуры охлажденной воды ряда действующих водоемов-охладителей различными методами с данными натурных измерений

Методы расчетов	Температура охлажденной воды, t_2 ($^{\circ}\text{C}$)							Диапазон отклонений t_2 ($^{\circ}\text{C}$)
	30.3	21.4	21.8	24.3	1.0	25.3	24.5	
	1	2	3	4	5	6	7	
Института гидромеханики НАНУ (ИГМ) [17]	30.2	21.4	21.9	24.3	1.5	25.0	24.2	0–0.5
МР-76 с использованием формулы Карпентера [10,15]	33.4	22.8	26.0	26.5	6.3	28.7	26.6	1.4–5.1
МР-76 с использованием формулы Браславского-Нургалиева [10–14]	29.9	20.6	22.7	23.1	1.5	24.4	23.0	0.4–1.5
МР-76 с использованием формулы Рымши-Донченко [10–19]	29.9	20.6	22.8	23.2	1.5	24.5	23.0	0.4–1.5
Браславского (формула Браславского-Нургалиева) [10–14]	28.5	20.7	21.3	22.9	0.8	24.1	23.0	0.2–1.8
Браславского (усовершенствованная формула испарения) [16]	30.8	21.6	23.1	24.7	2.9	26.9	25.4	0.2–1.9
Безызвестных [20]	31.1	21.9	23.5	24.9	3.6	24.0	23.0	0.5–4.6
Д. Харлемана (США) [18]	29.2	20.8	21.5	23.5	0.4	24.6	23.7	0.3–1.1

Примечание: Водоемы-охладители: 1 – Змиевской ГРЭС; 2 – Литовской ГРЭС; 3 – Заинской ГРЭС; 4 – Чернобыльской АЭС (летн. период); 5 – Чернобыльской АЭС (зимний период); 6 – Южно-Украинской АЭС; 7 – Курской АЭС.

с формулой Карпентера для вычисления $\alpha_{\text{и}}$ [10], МР-76 с использованием формулы Браславского-Нургалиева [10, 14], МР-76 с использованием формулы Рымши-Донченко [10–19], Браславского с использованием формулы Браславского-Нургалиева [14], Браславского [16], Безызвестных [20], Харлемана [18]. Из табл. 1 следует, что температура охлажденной воды t_2 , вычисленная по методам этих авторов, получилась со значительно большими отклонениями, чем по предлагаемому методу. Так, по МР-76 с использованием для вычисления $\alpha_{\text{и}}$ формулы Карпентера температура t_2 отклоняется от измеренной от 1,4 до 5, 1 $^{\circ}\text{C}$, по МР-76 с использованием формулы Браславского-Нургалиева – от 0,4 до 1, 5 $^{\circ}\text{C}$, по МР-76 с использованием формулы Рымши-Донченко – от 0,4 до 1, 5 $^{\circ}\text{C}$, по методу Браславского с его усовершенствованной формулой для $\alpha_{\text{и}}$ – от 0,2 до 1, 9 $^{\circ}\text{C}$, по методу Безызвестных – от 0,5 до 4, 6 $^{\circ}\text{C}$, по методу Харлемана – от 0,3 до 1, 1 $^{\circ}\text{C}$. Результаты расчетов с помощью

пограничного слоя дают те же значения t_2 , что получены по упрощенному методу и также приведены в табл. 1.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый метод теплового расчета водоемов-охладителей позволяет выполнить прогнозирование гидротермического режима водоемов-охладителей, а также значения температур охлажденной воды в водоеме с точностью, превышающей точность методов известных зарубежных авторов, в том числе и Харлемана (США), за счет более совершенных зависимостей коэффициента теплоотдачи испарением $\alpha_{\text{и}}$ при различных условиях стратификации приводного слоя, атмосферы, тепловой нагрузки на водоем от электростанции. Использование предлагаемого метода в практике про-

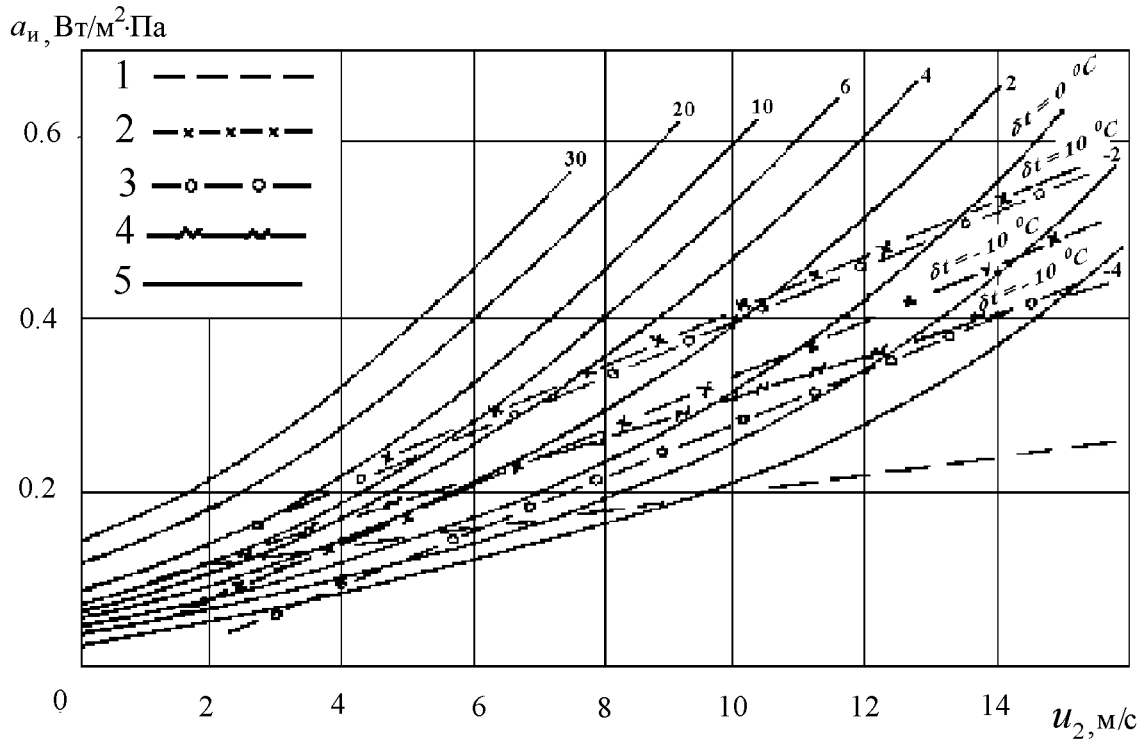


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента теплоотдачи испарением α_n от скорости ветра u_2 и перепада температур δt по формулам испарения: 1 – Карпентера [6,10]; 2 – Браславского-Нургалиева [6,9]; 3 – Харлемана [13]; 4 – по усовершенствованной формуле Браславского [11]; 5 – Института гидромеханики НАН Украины

ектирования водоемов-охладителей позволит снизить капитальные вложения на создание водоемов-охладителей ТЭС и АЭС.

Метод расчета внутреннего пограничного слоя можно использовать для решения ряда других прикладных задач, в частности при обтекании воздушным потоком сильно шероховатой поверхности лесных массивов [21].

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 742 с.
2. Никитин И. К. Сложные турбулентные течения и процессы переноса. – К.: Наук. думка, 1980. – 238 с.
3. Братсерт У.Х. Испарение в атмосферу. – Л.: Гидрометеонздат, 1985. – 356 с.
4. Панин Г.Н., Кривицкий С.В. Аэродинамическая шероховатость поверхности водоема. – М.: Наука, 1992. – 135 с.
5. Панин Г.Н., Дзюба А.В. и др. Взаимодействие вод суши с атмосферой. – М.: Наука, 1993. – 185 с.
6. Nikitin I.K., Zhadan V.I., Domanov V.N. Model of stratified turbulent wall layer and heat and mass transfer processes. – I, n. – с. Int. simp. stratified flows. Novosibirsk, 1972, New York, 1973, P.633-638.
7. Никитин И.К., Доманов В.Н., Костин А.Г. Метод расчета охлаждающей способности водоемов-охладителей с учетом трансформации и стратифи-

кации воздушного приводного слоя/ В кн.: Стратифицированные и турбулентные течения. – К.: Наук. думка, 1979. – С. 119-128.

8. Малинин В.Н. Влагооборот в системе океан-атмосфера. – СПб: Гидрометеонздат. – 1994. – 197 с.
9. Доманов В.Н. Расчет коэффициента теплообмена при обтекании жидких и шероховатых поверхностей // Гидромеханика. – 1977. – Вып. 35. – С. 113-121.
10. Методические рекомендации к расчету водохранилищ-охладителей ТЭС. П-33-75/ВНИИГ. – Л.: Энергия, 1976. – 34 с.
11. Гречушникова М.Т. Трансформация термической структуры стратифицированного водохранилища при изменении погоды // Водные ресурсы. – 2000. – 27, N2. – С. 159-166.
12. Гойса Н.И. Краткая характеристика суммарной радиации при ясном небе на территории Украины и Молдавии // Тр. Украинского Н.-И. гидромет. инта. – 1960. – Вып. 20. – С. 14-27.
13. Ефимова Н.А. О методике расчета месячных величин эффективного излучения // Метеорология и гидрология. – 1961. – N 10. – С. 28-33.
14. Браславский А., Чистяева С.П. Расчет испарения с поверхности оз. Балхаш по усовершенствованной методике/ В кн. Труды Казахского науч.-исслед. гидрометеорологического института. 1978. – Вып. 68. – С. 3-44.
15. Макаров И.И., Соколов А.С., Шульман С.Г. Моделирование гидротермических процессов в водохранилищах-охладителях ТЭС и АЭС. – М.: Энергоиздат, 1986. – 182 с.

16. *Браславский А.П., Кумарина М.Н., Смирнова М.Е.* Тепловое влияние объектов энергетики на водную среду.– Л.: Гидрометеониздат, 1989.– 252 с.
17. *Костин А.Г., Никифорович Е.И., Доманов В.Н., Киссин В.А.* Исследование гидроаэротермических процессов водоемов, подверженных тепловым сбросом ТЭС и АЭС //Материалы конференций и совещаний по гидротехнике "Основные направления совершенствования исследований и проектирования энергетических объектов" // ВНИИГ.–СПБ.– 1992.– С. 38-42.
18. *Harleman D.R.F., Brocard D.N., Najarian T.O.A.* A predictive modell for transient temperature distribution in unsteady flows // M.I.I.R. Parsons Lab. Water Res. and Hydrodyn.– 1973.– Rept. N 175.– P. 103.
19. *Рымша В.А., Донченко Р.В.* Исследование теплопотерь с открытой водной поверхности в зимнее время // Труды Гос. гидролог. ин-та.– 1958.– Вып. 65.– С. 54-83.
20. *Безызвестных А.В.* Моделирование водохранилищ-охладителей.– Алма-Ата: Наука, 1985.– 157 с.
21. *Nikiforovich E.I., Kostin A.G., Domanov W.N.* Transport processes in the stratifical boundary layers over the forest canopy.//Proceed. of Bioclimatology Inst. Gettingen, Germany.–1996.– P. 35-40.