

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ БАСЕЙНА-ИМИТАТОРА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО УЧЕТА ИСПАРЕНИЯ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА

И.Л. Калюжный

*ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,
Санкт-Петербург*

В целях оперативного управления водным ресурсом конкретного водохранилища разработана методика расчета конструктивных элементов бассейна для определения суточных величин испарения. В качестве примера произведен расчет бассейна-имитатора для наливного водохранилища. Исходными данными расчета являются факторы внешней среды: суммарная и отраженная солнечная радиация, температура воздуха; факторы водной массы: глубина проникновения солнечной радиации, прозрачность и мутность воды; высота борта бассейна, альbedo внутренней стороны его поверхности. Реализация метода расчета основана на установлении связи разности радиационного баланса, турбулентного теплообмена с атмосферой и теплообмена в воде с величинами разности между испарением с водоема и бассейна-имитатора. Показано, что при погрешности менее 1,0 мм/сут площадь его водного зеркала равна 29,6 м², глубина – 3 м, альbedo надводной части – 0,70, а подводной – 0,1.

Ключевые слова: бассейн-имитатор, методика расчета, водохранилище, факторы внешней среды.

RATIONALE FOR THE DESIGN OF A SIMULATOR POOL FOR OPERATIONAL ACCOUNTING FOR EVAPORATION FROM THE WATER SURFACE OF A RESERVOIR

I.L. Kalyuzhny

State Hydrological Institute, St. Petersburg

For the purpose of operational management of the water resource of a particular reservoir, a methodology has been developed for calculating the structural elements of the pool used to determine the daily values of evaporation. As an example, a simulator pool was calculated for a off-stream reservoir. The initial calculation data are environmental factors: total and reflected solar radiation, air temperature; water mass factors: penetration depth of solar radiation, water

transparency and turbidity; the height of the side-board of the pool, the albedo of the inner side of its surface. The implementation of the calculation method is based on establishing a connection between the difference in the radiation balance, turbulent heat exchange with the atmosphere, and heat exchange in water, and the difference between evaporation from the reservoir and from the simulator pool. It is shown that with an error of less than 1.0 mm/day, the area of its water table is 29.6 m², the depth is 3 m, the albedo of the above-water portion of side board is 0.70, and of the underwater portion is 0.1.

Key words: *simulator pool, calculation method, reservoir, environmental factors.*

Введение

Определению испарения с водной поверхности объектов вод суши уделяется значительное внимание со стороны специалистов различных направлений науки и практики. По этой проблеме имеются многочисленные научные публикации и ряд разнообразных приборов, позволяющих измерять величину испарения с той или иной достоверностью. Разнообразные конструкции испарителей удовлетворяли требованиям уравнения водного баланса изолированного объема воды. Их конструктивные характеристики определялись путем полевых экспериментальных исследований [1–3]. Многолетние поиски различных вариантов испарителей, выполненные под эгидой Всемирной метеорологической организации в ряде стран, позволили обосновать применение испарителя класса А (США), ГГИ-3000 (СССР) и испарительного бассейна площадью 20 м².

Дальнейшее усовершенствование испарителя ГГИ-3000 позволило, как в СССР, так и в США, создать теплоизолированный испаритель. В основу его создания положено условие, что погрешность в определении величины испарения за счет теплообмена испарителя с грунтом не должна превышать величины инструментальной ошибки определения уровня воды в испарителе (в эквивалентном тепловом выражении) [4, 5]. Устранение теплообмена водной массы испарителя с грунтом приблизило показания этого прибора к величинам испарения, определяемым по испарительному бассейну, установленному в грунте или на плоту в водоеме [6]. Поиски возможностей свести к минимуму эти различия не нашли окончательного решения.

Основная цель настоящей работы заключается в создании бассейна-испарителя, учитывающего основные факторы, влияющие на процесс испарения с конкретного водоема. Параметры такого бассейна должны минимизировать разность в потерях воды на испарение в бассейне и водохранилище. Условно такой прибор можно назвать «бассейн-имитатор». Идея создания бассейна-имитатора, являющегося продолжением работы [4], была обоснована В.С. Голубевым и И.Л. Калужным.

Объект исследования и методы определения его характеристик

Обоснование методики расчета бассейна-имитатора рассматривается на примере наливного водохранилища сезонного регулирования. Наполнение водохранилища осуществляется в осенне-зимний период; выпуск воды происходит в весенне-летний период при поливах сельскохозяйственных земель. За время заполнения водохранилища отметка его водного зеркала поднимается почти на 30 м, а площадь поверхности увеличивается от 20 до 70 км² и более. В наполненном состоянии площадь водохранилища равна 77,35 км², при минимальном уровне – 22,28 км². Наибольшая глубина 40 м; средняя – 20 м. Его емкость – 1,5 млрд м³ воды. Оперативный учет площади водного зеркала производится на основе ежедневных водомерных наблюдений с использованием установленной зависимости площади зеркала от отметки уровня воды в водохранилище.

В процессе полевых работ, охватывающих все фазы эксплуатации водохранилища, определялся ряд характеристик его водной массы.

Для оценки величины проникновения солнечной радиации в водную толщу использовался подводный пиранометр. Одновременно с этими измерениями проводилось определение альбедо водной поверхности, с помощью походного пиранометра, и его зависимости от высоты солнца, а также глубины прозрачности воды с использованием белого диска. При всех определениях использовались методики, применяемые в системе Росгидромета [7]. Атмосферные осадки в период сработки водохранилища отсутствовали.

Исходными данными для выполнения этой разработки послужили результаты научных исследований, изложенные в монографии [8], в нормативном документе [9], в статьях [4, 11–13], а также результаты полевых измерений.

Общее уравнение связи между величинами испарения с водохранилища и бассейна-имитатора

Определение величины испарения с водной поверхности бассейна-имитатора, как и других подобных приборов, основано на уравнении водного баланса

$$E = h_n - h_k + P, \quad (1)$$

где h_n и h_k – отметка уровня воды в бассейне в начальный и конечный сроки измерений; P – слой осадков между сроками измерений.

Согласно уравнению (1), корпус бассейна не должен иметь течи, а величины осадков, измеренные в отдельном наземном осадкомере, должны соответствовать величинам, учтенным бассейном-имитатором.

Уравнение связи между величинами испарения бассейна (E_6) и водоема (E) в общем виде можно выразить следующим образом

$$E = E_6 + \Delta E, \quad (2)$$

где ΔE – разность между испарением с водоема и с имитатора.

Оценим влияние конструкционных элементов имитатора на ΔE , аналогично работе М.П. Тимофеева [8], путем сравнения уравнений теплового баланса для водоема

$$R = LE + P + B \quad (3)$$

и бассейна-имитатора

$$R_6 = LE_6 + P_6 + B_6, \quad (4)$$

где R и R_6 – соответственно, радиационный баланс водоема и бассейна-имитатора.

Для разности испарения с поверхности водоема и бассейна-имитатора, согласно выражениям (3) и (4), получаем выражения

$$E = 1/L (\Delta R - \Delta P - \Delta B), \quad (5)$$

где L – теплота парообразования; ΔR , ΔP и ΔB – соответственно, разности радиационного баланса, турбулентного теплообмена с атмосферой и теплообмена в воде.

Исследуя составляющие уравнения (5), М.П. Тимофеев [8] пришел к убедительным выводам о том, что для интервалов «сутки и более» возможно непосредственно использовать данные испарительного бассейна для определения величины испарения с водоема. Такой метод определения величины испарения с водоема имеет то преимущество, что он включает надежно определяемую величину испарения с бассейна-имитатора.

Обоснование связей характеристик бассейна-имитатора с факторами, обуславливающими испарение с водохранилища

Реализация этого метода требует установления связи слагаемых уравнения (5) с величиной ΔE . В работе [11] показано, что разность радиационного баланса в области коротковолнового излучения связана с высотой бортика бассейна, его диаметром, отражательными свойствами надводной и подводной частей его внутренней поверхности.

Разность теплообмена в воде обусловлена глубиной бассейна-имитатора, его теплоизолирующими свойствами и свойствами воды, которые характеризуют функцию поглощения коротковолновой солнечной радиации.

Разность радиационного баланса в области длинноволнового излучения и разность турбулентного теплообмена с атмосферой зависят в основ-

ном от разности температур поверхности воды водоема и бассейна-имитатора.

Анализ условий формирования теплового баланса водоема и бассейна-имитатора показывает, что конструктивными элементами бассейна-имитатора, определяющими величину поправки к суточным суммам измеряемого испарения, будут:

- высота надводной части (бортика) бассейна (Z);
- диаметр ($2r$) и глубина бассейна (H);
- толщина корпуса (δ) и теплопроводность его материала (λ);
- отражательные свойства покрытий надводной и подводной частей

внутренних поверхностей бассейна.

Фактором, обуславливающим высоту бортика бассейна, является установленная экспериментальным путем высота, которая должна препятствовать разбрызгиванию капель дождя при их попадании на поверхность воды бассейна. Согласно работам [12, 13], этому положению соответствует высота бортика в 30 см.

Диаметр бассейна может быть вычислен из условия задания величины $L(\Delta E)$ по выражению

$$R_0 - R_z = S(1 - A)(1 - \eta)(1 - A_z) \leq L(\Delta E), \quad (6)$$

где $R_0 - R_z$ – баланс коротковолновой солнечной радиации, прошедшей через единицу водной поверхности бассейна-имитатора при высоте бортика, равной 0 и Z (см) соответственно; S – величина прямой солнечной радиации, падающей на единицу горизонтальной поверхности; A и A_z – соответственно, альбедо водной поверхности и внутренней поверхности надводной части бортика бассейна для прямой солнечной радиации; η – доля площади водной поверхности бассейна, на которую попадают прямые солнечные лучами, равна [11]

$$\eta = (\alpha/180) - (1/\pi) \sin \alpha, \quad (7)$$

где α – центральный угол сегмента (в градусах), величина которого зависит от отношения диаметра бассейна ($2r$) к надводной части бортика (Z) и угла высоты солнца (h_\odot), определяется из выражения

$$\alpha = 2 \arctg \sqrt{\left(\frac{2r}{z}\right)^2 \operatorname{tg}^2 h - 1}. \quad (8)$$

Покрытие надводной части внутренней поверхности бортика испарителя осуществляется путем нанесения белой краски (цинковых белил), обеспечивающей альбедо, близкое к 0,7. Покрытие подводной части внутренней поверхности бака выбирается из условий: его альбедо должно быть меньше альбедо водной поверхности водоема при высотах солнца более 45° . Покрытие подводной части бассейна должно быть черного цвета.

Глубина бассейна-имитатора определяется из условий задания величины $L(\Delta E)$ и функции убывания радиации с глубиной. Приближенно эта зависимость аппроксимируется экспоненциальным законом, в виде уравнения

$$Q_H = Q_0 (1 - A) e^{-aH}, \quad (9)$$

где a – коэффициент ослабления радиации; H – глубина; Q_0 – суммарная солнечная радиация, падающая на поверхность воды; A – альbedo водной поверхности водоема; e – основание натуральных логарифмов.

Учитывая, что коэффициент ослабления радиации зависит от замутненности водоема, глубина бассейна-имитатора может значительно варьировать. Поэтому оценка глубины должна производиться с учетом характеристик вод конкретного водоема. Отсюда следует что, глубина бассейна определяется из условия

$$Q_H \leq L(\Delta E). \quad (10)$$

Толщина боковой стенки (δ_1) и дна (δ_2) бассейна может быть определена на основе сведений о теплоизоляционных свойствах используемого материала согласно выражению

$$1/\pi r^2 (q_1 F_1 + q_2 F_2) \leq L(\Delta E), \quad (11)$$

где q_1 и q_2 – отток или приток тепла через единицу поверхности бассейна, соответственно, боковой стенки площадью F_1 и дна – F_2 .

Для стационарных условий теплообмена взаимосвязь между толщиной корпуса и погрешностью можно записать в следующем виде

$$\lambda \tau [2n \Delta T_1 / r^2 \ln(r^2 + q_1 r/r) + \Delta T_2 / q_2] \leq L(\Delta E), \quad (12)$$

где λ – коэффициент теплопроводности выбранного материала; ΔT_1 и ΔT_2 – перепад температур на боковой стенке и дне; τ – продолжительность временного интервала; r – радиус бассейна; H – глубина бассейна.

Устранение теплообмена водной массы испарителя с грунтом, посредством применения теплоизоляционных покрытий на внешней поверхности бассейна, приближает показания бассейна-имитатора к величинам испарения с водохранилища, но не учитывает ряд иных факторов, обуславливающих испарение.

Исходные данные для расчета элементов бассейна-имитатора

Выбор размеров конструктивных элементов бассейна-имитатора зависит от задаваемой погрешности определения испарения и комплекса гидрометеорологических характеристик, относящихся к району расположения водохранилища. Часть из них (полуденная высота солнца, суммар-

ная и прямая солнечная радиация, внутригодовое распределение и величина атмосферных осадков) может быть получена из режимно-справочных изданий. Другая часть сведений (альbedo водной поверхности и проникающая в воду радиация) должна быть получена в результате полевых работ непосредственно на водохранилище.

Измерение альbedo водной поверхности водохранилища и оптических свойств его водной массы производилось в период с 21.04.1989 по 01.11.1989 г. Всего произведено 91 измерение при высотах солнца от 16 до 73°. Измерения производились на расстоянии 600–800 м от плотины водохранилища.

Результаты измерений приведены на рис. 1. Зависимость осредненных значений альbedo суммарной радиации от высоты солнца при условии безоблачного или малооблачного неба, а также слабого волнения имеет следующий вид:

$$A = 5 \left[1 + 0,008 e^{2,5\pi(1-h_{\odot}/90)} \right], \quad (13)$$

где A – альbedo (%); h_{\odot} – угол высоты солнца (°); e – основание натурального логарифма.

Отдельные измерения альbedo при близких высотах солнца имеют значительный разброс, что может быть обусловлено как различиями соотношений рассеянной и прямой солнечной радиации, так и различиями в содержании взвесей в воде водохранилища.

Произведенные оценки показывают, что при высотах солнца более 35° от водной поверхности отражается только 5–10 % падающей солнечной радиации, а 95–90 % ее проникает в водную толщу и после преломления и многократного рассеяния преобразуется в тепловую энергию.

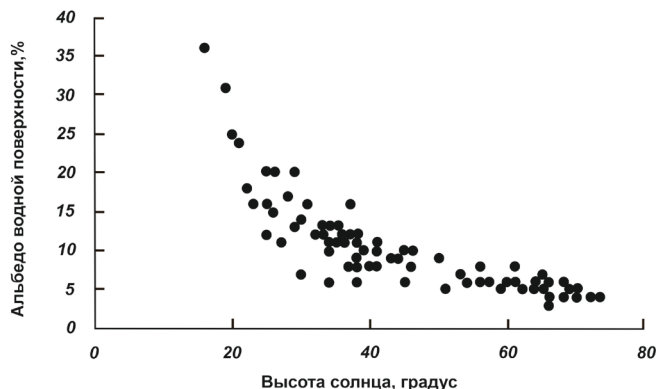


Рис. 1. Зависимость альbedo водной поверхности водохранилища от высоты солнца

Теоретически количество проникающей на глубину солнечной радиации может быть описано формулой Ламберта [9]. Она справедлива для воды, не содержащей примесей. В природных водах на коэффициент поглощения оказывают влияние как длина волны, так и наличие в воде растворенных, взвешенных и красящих веществ. Поэтому коэффициент поглощения изменяется в широких пределах и непропорционален длине световой волны. Поэтому одновременно с измерением проникающей радиации и альбедо водной поверхности проводились измерения глубины прозрачности воды с помощью белого диска (диск Секки). За период с апреля по ноябрь 1989 г. было произведено 18 серий измерений.

Анализ материалов измерений показывает (рис. 2), что доля солнечной радиации, проникающей на различные глубины водохранилища, в значительной мере зависит от относительной глубины прозрачности его вод. Относительная глубина прозрачности этого водохранилища имеет свой специфический режим и изменяется от 0,7 до 8,0 м и более.

Особенности режима относительной глубины прозрачности вод водохранилища связаны с режимом его заполнения и сработки (опорожнения). Водохранилище заполняется водами, богатыми взвешенными наносами. Мутность воды, перекачиваемой в водохранилище из подводящего канала, колеблется от 385 до 1396 г/м³. При этом фракции диаметром более 0,01 мм осаждаются в водохранилище, а фракции менее указанного размера проходят через него транзитом.

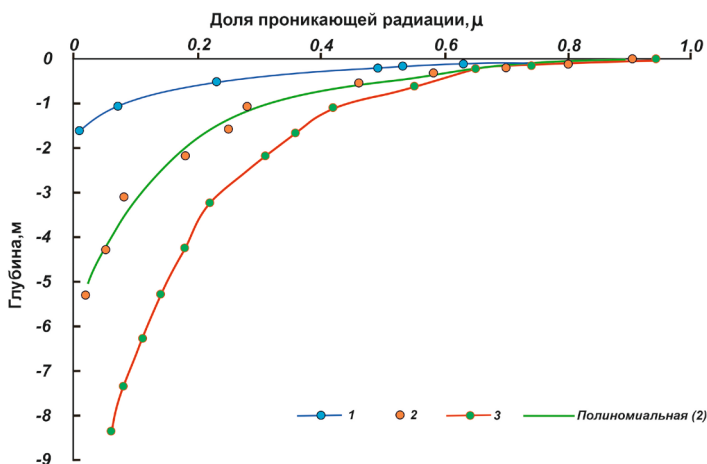


Рис. 2. Зависимость доли проникающей радиации (μ) на различную глубину (Z) водохранилища от относительной глубины прозрачности воды (C).

Условные обозначения: 1 — $C = 0,7$ м; 2 — $C = 2,9$ м; 3 — $C = 8,9$ м

Осаждению взвешенных частиц и осветлению вод, после прекращения наполнения водохранилища, способствует повышенная минерализация воды, от 0,65 до 0,97 г/дм³.

Графический анализ всей совокупности материалов по измерению проникающей радиации позволил установить зависимость коэффициента ослабления от глубины (Z) и относительной глубины прозрачности воды (C):

$$Q_z = Q_0 (1 - A) e^{-(1,34/\sqrt{C}) + 0,46\sqrt{Z}}, \quad (14)$$

где e – основание натурального логарифма; Q_0 – падающая суммарная радиация; A – альбедо.

Для отыскания численных значений коэффициентов в формуле (14) обработка материалов измерений была произведена в следующей последовательности. В начале для каждого измерения был вычислен коэффициент, характеризующий относительное ослабление радиации с глубиной

$$\mu_z = Q_z / Q_0 (1 - A). \quad (15)$$

Затем для всей совокупности измерений были вычислены отношения $\ln \mu_z / \sqrt{z} = f(C)$, которые были сгруппированы по градациям значений относительно глубины прозрачности воды (табл. 1).

Далее графически была определена эмпирическая зависимость между μ_z , Z и C :

$$-\ln \mu_z / \sqrt{z} = [0,46 + 1,34(1/\sqrt{C})] \quad (16)$$

и

$$\mu_z = e^{-(1,34 + 0,46)\sqrt{z}}. \quad (17)$$

Пространственно-временной анализ относительной глубины прозрачности воды водохранилища (табл. 2) показывает, что наибольшая прозрачность воды приходится на вторую половину апреля и достигает почти 9 м по всей акватории. Однако такая прозрачность воды сформировалась при отсутствии заполнения водохранилища в течение двух месяцев. При воз-

Т а б л и ц а 1

**Осредненные значения параметров функции ослабления
солнечной радиации**

Параметр	Относительная глубина прозрачности вод, μ_z					
	8,7	5,6	4,5	2,6	1,4	0,7
$\ln \mu_z / \sqrt{z}$	-0,88	-1,44	-1,12	-1,28	-1,72	-2,00
$1/\sqrt{C}$	0,34	0,42	0,47	0,62	0,85	1,19

Таблица 2

Глубина относительной прозрачности водохранилища, м

Дата	Место измерений				Примечание
	у плотины № 2	между плотин № 2 и центром	в центре	между центром и плотиной № 1	
20.04.1989	8,9	8,8	8,10	8,5	Нет закачки
23.05.1989	6,2	6,3	6,1	2,3	Есть закачка
24.05.1989	5,6	4,6	2,6	1,8	Есть закачка
25.05.1989	5,7				Есть закачка
29.05.1989	4,5				Есть закачка
31.05.1989	5,6				Нет закачки
08.08.1989	1,2				Нет закачки
09.08.1989	1,2				Нет закачки
10.08.1989	1,2				Нет закачки
30.08.1989	2,5				Есть закачка
31.10.1989	2,8				Есть закачка
01.11.1989	2,3				Есть закачка

обновлении закачки прозрачность воды убывает довольно резко. По мере роста температуры воздуха и воды прозрачность вод водохранилища падает почти до 2 м и начинает возрастать до 2–3 м лишь в октябре–ноябре в период закачки.

Таким образом, в режиме прозрачности вод водохранилища можно выделить следующие периоды:

1. Период заполнения водохранилища. Обычно этот период длится с сентября по февраль. Глубина относительной прозрачности вод в этот период составляет 2–3 м и зависит от мутности закачиваемой воды.

2. Период отстоя. Этот период приходится на март–апрель. При отсутствии налива воды и сбросов происходит осаждение взвешенных частиц. Глубина прозрачности быстро увеличивается с 2–3 до 8–9 м.

3. Период сработки водохранилища. В этот период изменения прозрачности воды наибольшие, от 8–9 в конце апреля до 1–2 м в августе. В период сработки уменьшение глубины прозрачности обусловлено несколькими причинами. К ним могут быть отнесены развитие фитопланктона, взмучивание, вызванное сработкой водохранилища и уменьшением его общей глубины, а также возрастания запыления атмосферы в летний период.

Рассматриваемый район характеризуется незначительными суммами атмосферных осадков. Атмосферные осадки выпадают в основном в те-

Таблица 3

**Прямая солнечная радиация на горизонтальную поверхность, кВт/м²
по наблюдениям сети актинометрических станций (38° с.ш.)**

Месяц	Прямая радиация в часы местного среднесолнечного времени					Сумма за сутки
	6 ч 30 мин	9 ч 30 мин	12 ч 30 мин	15 ч 30 мин	18 ч 30 мин	
01		0,28	0,45	0,16		6,29
02		0,38	0,57	0,26		12,44
03	0,04	0,51	0,69	0,36		16,89
04	0,10	0,61	0,80	0,45		20,95
05	0,19	0,68	0,84	0,51	0,02	23,51
06	0,20	0,69	0,84	0,53	0,03	24,18
07	0,16	0,64	0,80	0,52	0,05	22,71
08	0,13	0,60	0,77	0,46	0,02	20,82
09	0,06	0,54	0,71	0,36		17,47
10	0,02	0,48	0,60	0,20		13,53
11		0,41	0,48	0,13		10,01
12		0,28	0,42	0,10		7,16

чение декабря–апреля. Их месячная сумма варьирует от 3 до 90 мм. В летние месяцы они, как правило, отсутствуют.

Прямая и суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность характеризуется значениями, близкими к условиям безоблачного неба, так как в рассматриваемом регионе очень большое число ясных дней и низкий балл общей и нижней облачности (табл. 3).

Определение размеров конструктивных элементов бассейна-имитатора

В состав конструктивных элементов бассейна-имитатора входят высота бортика, выступающего над водной поверхностью, и покрытие его внутренней поверхности, диаметр емкости, ее глубина, покрытие подводной части боковой поверхности и дна, толщина боковой стенки и дна.

Установлено, что высота бортика, равная 30 см, надежно гарантирует от выбрызгивания дождевых капель и появления систематических ошибок при измерении испарения. При такой высоте бортика ошибка в определении испарения не превысит 0,2 мм/сут., если максимальная суточная сумма осадков выпадает с интенсивностью 1 мм/мин [11–13].

Диаметр бака бассейна-имитатора определяется из условий (6) с учетом выражений (7) и (8), на основе данных о координатах пункта, альбедо водной поверхности, альбедо внутренней поверхности бортика и сведений о суточных суммах прямой солнечной радиации.

Выполнив простейшие преобразования выражения (6), найдем для условий водохранилища взаимосвязь между ошибкой определения испарения для различных месяцев года и долей площади поверхности воды в бассейне-имитаторе, освещенной прямыми солнечными лучами:

$$\eta \geq 1 - L(\Delta E)/S(1 - A) \times (1 - A_z). \quad (18)$$

Наибольшие значения η при одинаковых ошибках испарения (ΔE) приходятся на июнь. Для дальнейших расчетов используется только этот месяц, так как для остальных месяцев требуемое условие выполняется автоматически.

Взаимосвязь между долей площади, освещенной прямыми солнечными лучами (η), и относительным диаметром бака бассейна-имитатора ($2r/Z$) при различных углах высоты солнца (рис. 3) может быть определена из совместного решения выражений (7) и (8).

Для того чтобы, пользуясь комплексным графиком (см. рис. 3), можно было определить относительный диаметр бассейна по заданной погрешности измерения, необходимо установить для широты этого водохранилища минимальный угол высоты солнца, при котором неравенство (6) обеспечивается в большинстве суток. Такая высота угла солнца, равная 10° , была установлена на основе анализа внутрисуточного хода прямой солнечной радиации во все месяцы года.

На основе комплексного графика (см. рис. 3), задаваясь ΔE , были определены соответственные значения $2r/Z$ при фиксированных значениях A_z , равном 10° .

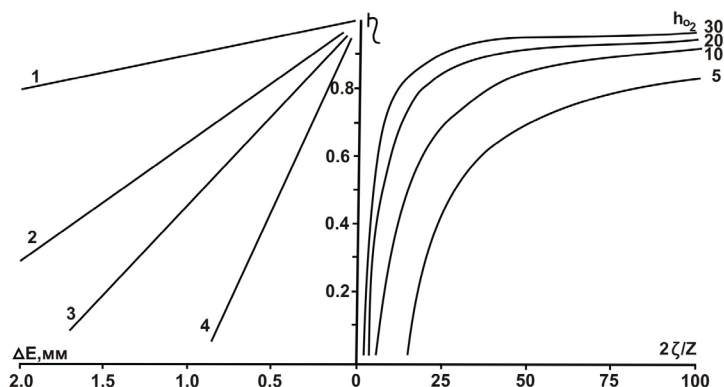


Рис. 3. Комплексный график связи между долей площади, освещенной солнечными лучами (η), ошибкой воспроизведения испарения (ΔE), относительным диаметром бассейна-имитатора ($2r/Z$) при различных высотах солнца (h_0) и альбедо бортика (A_z):

$$1 - A_z = 0; 2 - A_z = 0,7; 3 - A_z = 0,8; 4 - A_z = 0,9$$

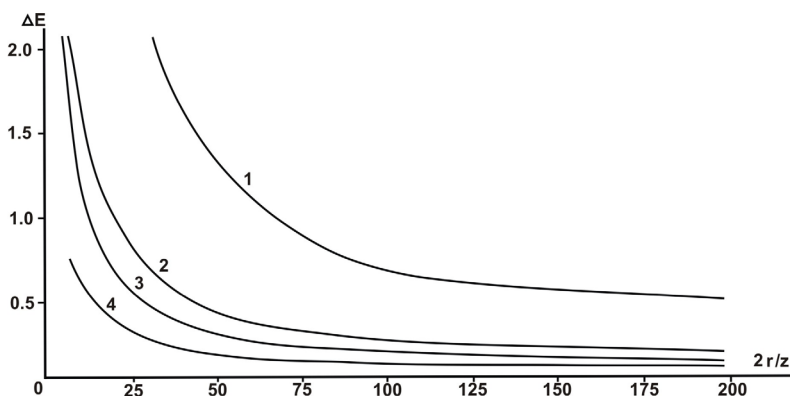


Рис. 4. Зависимость ошибки воспроизведения испарения (ΔE , мм/сут.) от относительного диаметра бассейна-имитатора ($2r/z$) и альbedo его внутреннего бортика (A_z):

$$1 - A_z = 0; 2 - A_z = 0,7; 3 - A_z = 0,8; 4 - A_z = 0,9$$

Анализ полученной зависимости (рис. 4) показывает, что за счет подбора покрытий, влияющих на альbedo внутренней поверхности бортика, можно существенно влиять на величину относительного диаметра бака бассейна-имитатора.

Расчет глубины бассейна-имитатора произведен на основе формулы (9) с использованием зависимости (14). Путем простейших преобразований формула (9) приведена к более удобному для расчетов виду

$$H \geq \left[\frac{\ln Q_0 (1 - A) - \ln L \Delta E}{1,34 / \sqrt{C}} \right]^2. \quad (19)$$

Оценочные расчеты глубины бассейна-имитатора, выполненные по средним для месяца значениям поглощенной радиации $Q_0(1 - A)$ и относительной глубины прозрачности воды C для фиксированных величин ошибок воспроизведения испарения ΔE , приведены в табл. 4. Из анализа полученных оценок следует, что при любой заданной ошибке наибольшая глубина бассейна необходима в апреле. В этом месяце сочетаются довольно высокие суммы суммарной солнечной радиации с наибольшей (до 9 м) относительной глубиной прозрачности воды.

При фиксированной глубине бассейна, равной 3 м, что не вызывает особых затруднений при реализации, ошибка воспроизведения испарения в апреле и мае не будет превышать 2 мм/сут., в марте и июне – 1,5 мм/сут., в феврале, июле, августе, сентябре и октябре – 1,0 мм/сут., а в январе и декабре – 0,5 мм/сут.

Таблица 4

**Оценка глубины бассейна-имитатора при фиксированной ошибке
воспроизведения испарения с поверхности водохранилища**

Месяц	Глубина (м) при ошибке испарения, не превышающей						
	0,1 мм	0,2 мм	0,3 мм	0,5 мм	1,0 мм	1,5 мм	2,0 мм
Январь	8,7	5,7	4,3	2,7	1,2	0,58	0,29
Февраль	12,0	8,3	6,4	4,4	2,3	1,4	0,85
Март	18,3	12,9	10,2	7,2	4,0	2,5	1,7
Апрель	25,4	18,3	14,7	10,7	6,3	4,2	3,0
Май	21,9	15,9	12,8	9,5	5,7	3,9	2,9
Июнь	16,0	11,6	9,4	6,9	4,2	2,9	2,1
Июль	11,0	8,0	6,4	4,7	2,8	1,9	1,4
Август	8,7	6,2	5,0	3,6	2,1	1,4	1,0
Сентябрь	9,7	6,9	5,4	3,9	2,2	1,4	0,97
Октябрь	9,9	6,8	5,3	3,7	1,9	1,2	0,73
Ноябрь	9,3	6,2	4,7	3,0	1,4	0,73	0,39
Декабрь	8,1	5,2	3,8	2,4	0,95	0,42	0,17

Оценка толщины теплоизоляционного покрытия произведена по выражению (12). Были рассмотрены три варианта теплоизоляционных покрытий: пенобетон, стекловата и пенопласт. Выполненные оценки показывают, что выбор толщины теплоизоляции обусловлен коэффициентом теплопроводности теплоизоляционного материала, диаметром ($2r$) и глубиной (H) бассейна, перепадом температур между водной массой и окружающим почво-грунтом, а также устанавливаемой погрешностью воспроизведения испарения (ΔE). При перепаде температур, равном 10° , и глубине бассейна, равной 3 м, толщина тепловой изоляции составляет от 5 до 25 см при погрешности воспроизведения испарения от 0,1 до 1 мм/сут. и более.

Однако возможен расчет характеристик тепловой изоляции, при условии, что теплообмен между грунтом и контактом с площадью дна и боковой поверхностью испарителя будет меньше или равен эквиваленту (в тепловом выражении) инструментальной погрешности слоя определения испарения, согласно [4, 5].

В соответствии с полученными оценками при погрешности воспроизведения испарения менее 1 мм/сут. высота бортика бассейна должна быть 30 см, его диаметр – 6 м, глубина – около 3 м, толщина тепловой изоляции из пенобетона – 10–15 см, а из пенопласта или стекловаты – около 5 см. Альbedo надводной части внутренней поверхности должно быть около 0,70 (эмаль белая), а подводной части – менее 0,1 (водостойкое покрытие черного цвета). Площадь испаряющей поверхности – 29,6 м²; объем водной массы – 97,7 м³.

С учетом приведенных характеристик была разработана конструкция и на предприятиях химической промышленности изготовлен, собственно, бассейн-имитатор.

Заключение

Выполнено обоснование и разработана методика расчета конструкции бассейна-имитатора для оперативной оценки потерь воды на испарение с конкретного водохранилища. В качестве примера основные элементы испарителя рассчитывались непосредственно для водохранилища наливного типа. Наполнение его происходит в осенне-зимний период, выпуск воды – в весенне-летний при поливах сельскохозяйственных земель. Амплитуда уровня воды достигает 30 м при изменении площади водохранилища в 55,07 км². При этом существенно изменяется альбеда водной поверхности, глубина прозрачности воды и доля проникновения солнечной радиации. Для реализации инструментального метода оперативной оценки испарения с поверхности водохранилища выполнены полевые определения отраженной и поглощенной солнечной радиации, степени прозрачности воды, ее мутности в процессе наполнения и сработки водохранилища. Результаты полевых исследований использованы для разработки методики оценки размеров конструктивных элементов бассейна-имитатора. Произведены расчеты и разработаны исходные зависимости, отражающие взаимосвязь между величиной ошибки воспроизведения испарения бассейном-имитатором, высотой его борта, диаметром, глубиной, а также оптическими характеристиками покрытий надводной и подводной частей бассейна. При погрешности воспроизводства испарения менее 1 мм/сут. определены конструктивные характеристики бассейна-имитатора.

Литература

1. Урываев В.А. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. Л.: Гидрометеиздат, 1953. 232 с.
2. Кузнецов В.И. Исследования испарения с водной поверхности // Труды ГГИ. 1969. Вып. 176. С. 127–148.
3. Константинов А.Р., Федорова Т.Г., Голубев В.С. Влияние различных факторов на показания водных испарителей, установленных на суше // Труды ГГИ. 1960. Вып. 76. С. 67–111.
4. Калужный И.Л., Голубев В.С., Федорова Т.Г. Теплоизолированный водный испаритель ГГИ-3000ТМ и результаты его испытаний // Труды ГГИ. 1980. Вып. 266. С. 74–85.
5. Калужный И.Л., Химин Н.М. Методы расчета теплоизолированной оболочки водного испарителя // Метеорология и гидрология. 1977. № 8. С. 101–104.

6. *Калюжный И.Л., Решетников Ф.Ю.* Сравнение результатов многолетних наблюдений за испарением с водной поверхности по теплоизолированному испарителю ГГИ-3000ТМ с показанием приборов водно-испарительного комплекса ВФ ГГИ // Труды ГГО. 2020. Вып. 599. С. 59–73.
7. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеоздат, 1976. Вып. 7, ч. 2. 478 с.
8. *Тимофеев М.П.* Метеорологический режим водоемов. Л.: Гидрометеоздат, 1963. 292 с.
9. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 84 с.
10. *Голубев В.С.* Предварительная оценка условий обмена теплом и влагой в испарителях ГГИ-3000 и испарительных бассейнах // Труды ГГИ. 1988. Вып. 331. С. 89–100.
11. *Голубев В.С.* Влияние бортика испарителя на поглощаемую водной массой прямую солнечную радиацию // Труды ГГИ. 1988. Вып. 331. С. 81–88.
12. *Голубев В.С.* Об учете дождевых осадков различными приборами // Труды ГГИ. 1960. Вып. 81. С. 5–17.
13. *Струзер Л.Р., Дьячкова.* О разбрызгивании дождевых капель // Труды ГГО. 1965. Вып. 195. С. 120–132.