



МЕТОД РАСЧЕТА ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ГЛУБОКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

В работе на основе анализа влияния основных факторов предложена методика расчетов термического режима глубоких малопроточных водохранилищ. Температура воды считалась изменяющейся как по глубине водохранилища, так и во времени и рассматривалась как сумма двух функций: стационарной, соответствующей среднегодовой температуре, и нестационарной, учитывающей сезонные колебания температуры. Приведен пример расчетов. Предложенная методика может быть использована при выполнении расчетов на предварительных этапах проектирования высоконапорных гидроузлов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: глубокое водохранилище, термический режим, сезонные колебания температуры, амплитуда колебаний, тепловые волны.

Введение. Согласно действующим нормам проектирования [2, 7–9] для обоснования надежности и безопасности бетонных гидротехнических сооружений следует выполнять расчеты изменяющегося во времени термического (температурного) режима и связанных с этим режимом температурных напряжений в этих сооружениях. Методам расчетов температурных полей и полей температурных напряжений в бетонных гидротехнических сооружениях посвящена обширная литература (см., например, [1, 3–5, 11] и др.). Значительное влияние на температурный режим бетонных сооружений в эксплуатационный период оказывают сезонные колебания температуры воды в водохранилище. В этот период температурный режим водохранилища определяет температуру бетона вблизи напорной грани и термический режим сооружения в целом, а также температурный режим его основания.

Характер изменения температуры воды во времени и по глубине водохранилища зависит от ряда факторов. В число этих факторов входит глубина и проточность водохранилища, расположение водосбросных отверстий гидроузла и водоприемных отверстий ГЭС, климатические факторы, включающие температуру воздуха, скорость ветра и др.

При оценке термического режима водохранилища обычно различают две зоны по глубине водохранилища: верхнюю зону глубиной до 40 м, в пре-

делах которой имеет место интенсивное изменение температуры воды, как по глубине, так и во времени, и нижнюю, в пределах которой изменение температуры воды незначительное.

Рассмотрим особенности температурного режима непроточных глубоких водохранилищ (глубиной более 100 м), создаваемых высокими бетонными плотинами. Для таких водохранилищ этот режим в основном зависит от сезонных колебаний температуры воздуха и от климатических условий района расположения водохранилища.

В условиях теплого климата температуры поверхности воды в водохранилище близки к среднемесячным температурам воздуха. Отличие этих температур не превышает 1–3 °С в ту или иную сторону. Амплитуда колебаний температуры поверхности воды может достигать 20–25 °С. Вблизи дна водохранилища температура воды близка к минимальной среднемесячной температуре воздуха. Амплитуда колебаний этой температуры не превышает 1–2 °С. На Рис. 1 а приведен вид графиков изменения по глубине минимальных и максимальных температур воды в водохранилище, расположенном в районе с теплым климатом.

Если водохранилище расположено в районе с суровым климатом, когда в зимний период имеют место отрицательные среднемесячные температуры воздуха, температуры поверхности воды в летний период близки к среднемесячным температурам воздуха с отклонениями 1–3 °С. В зимний период, после образования ледового покрова, температура поверхности воды близка к 0 °С и может оставаться такой в течение нескольких месяцев. Амплитуда колебаний температуры поверхности воды близка к значению среднемесячной температуре наиболее теплого месяца. Температура воды у дна водохранилища в рассматриваемом случае близка к 4 °С, т.е. к температуре, которая соответствует максимальной плотности воды. Амплитуда колебаний этой температуры незначительная и не превышает 1–2 °С. На Рис. 1 б приведен вид графиков изменения по глубине минимальных и максимальных температур воды в водохранилище, расположенном в районе с суровым климатом.

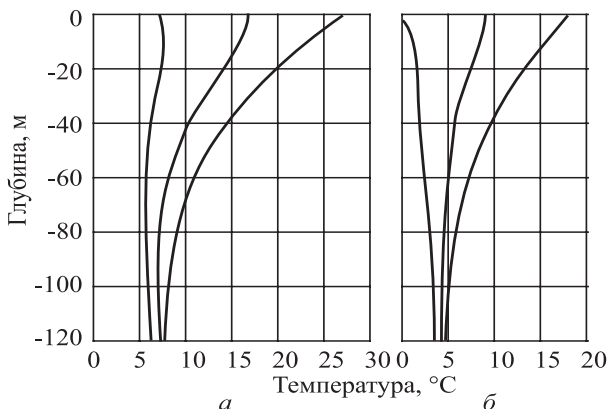


Рис. 1. Изменение по глубине минимальных и максимальных температур воды в непроточных глубоких водохранилищах а) — в районе с теплым климатом; б) — в районе с суровым климатом



Следует отметить, что имеет место смещение по фазе колебаний температуры поверхности воды в водохранилище по сравнению с колебаниями температуры воздуха на (1...1,5) месяца.

На окончательных этапах проектирования гидроузлов прогнозный термический режим водохранилищ устанавливается на основе специальных достаточно трудоемких расчетов. Методы и подходы, используемые в таких расчетах, изложены в специальной литературе ([6, 10] и др.).

Для оценки термического режима водохранилищ на предварительных этапах проектирования обычно используются данные натурных наблюдений за сезонными колебаниями температуры воды на эксплуатируемых водохранилищах-аналогах, имеющих параметры, близкие к параметрам проектируемого водохранилища и расположенных в районах с климатическими условиями, близкими к климатическим условиям района размещения проектируемого гидроузла.

Представляется целесообразным на предварительных этапах проектирования для определения термического режима водохранилищ использовать сравнительно несложные и достаточно достоверные упрощенные расчеты. В настоящее время отсутствуют общепринятые подходы к выполнению таких расчетов.

Настоящая работа посвящена разработке методики упрощенных расчетов термического режима непроточных глубоких водохранилищ. Эта методика основана на анализе данных натурных наблюдений за сезонными колебаниями температуры воды в эксплуатируемых водохранилищах и может быть использована на предварительных этапах проектирования.

Основные предпосылки. При разработке методики расчетов термического режима непроточных глубоких водохранилищ использовались следующие предпосылки, основанные на анализе данных натурных наблюдений за температурами воды в эксплуатируемых водохранилищах.

1. Считается, что изменяющийся во времени термический режим рассматриваемого водохранилища зависит только от сезонных колебаний температуры воздуха для расчетного года, который характеризуется максимальной $T_{a,max}$ и минимальной $T_{a,min}$ среднемесячными температурами воздуха, а также моментом времени $t_{a,0}$, соответствующим максимальной среднемесячной температуре воздуха. Значение $t_{a,0}$ отсчитывается от начала года.

2. Максимальная температура воды у поверхности водохранилища $T_{w,max,t}$ принимается на (1...3) °C выше среднемесячной температуры воздуха для наиболее теплого месяца расчетного года, т.е. $T_{w,max,t} = T_{a,max} + (1...3) °C$.

3. Минимальная температура воды у поверхности водохранилища $T_{w,min,t}$ принимается в зави-

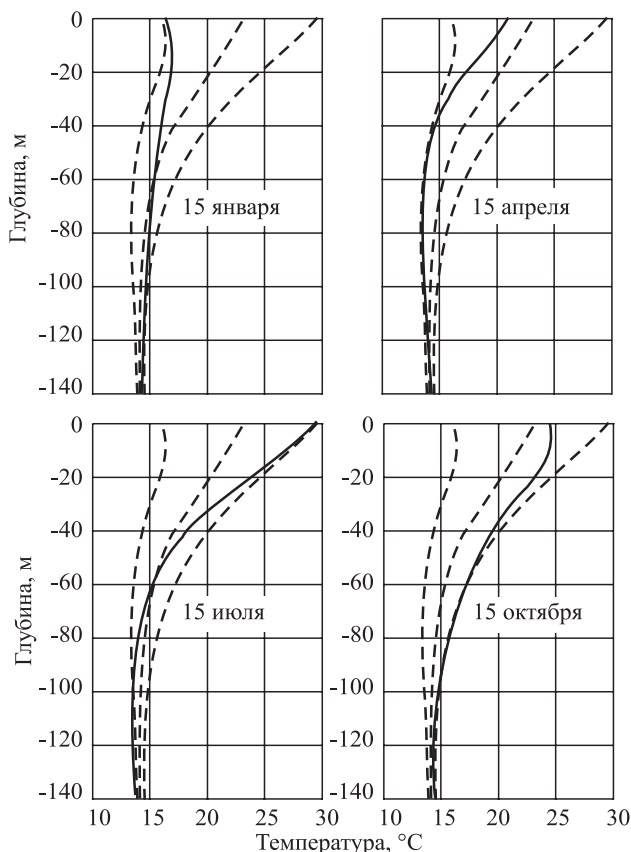


Рис. 2. Зависимости изменения температуры воды по глубине водохранилища головного гидроузла ГЭС Нам Чием во Вьетнаме

симости от климатических условий района, в котором расположено водохранилище. Если водохранилище расположено в районе с теплым климатом, который характеризуется положительными среднемесячными температурами воздуха в течение расчетного года, значение $T_{w,min,t}$ принимается на (1...3) °C выше среднемесячной температуры воздуха для наиболее холодного месяца расчетного года, т.е. $T_{w,min,t} = T_{a,min} + (1...3) °C$. При расположении водохранилища в районе с суровым климатом, когда в зимний период имеют место отрицательные среднемесячные температуры воздуха и на поверхности водохранилища образуется лед, принимается $T_{w,min,t} = 0 °C$.

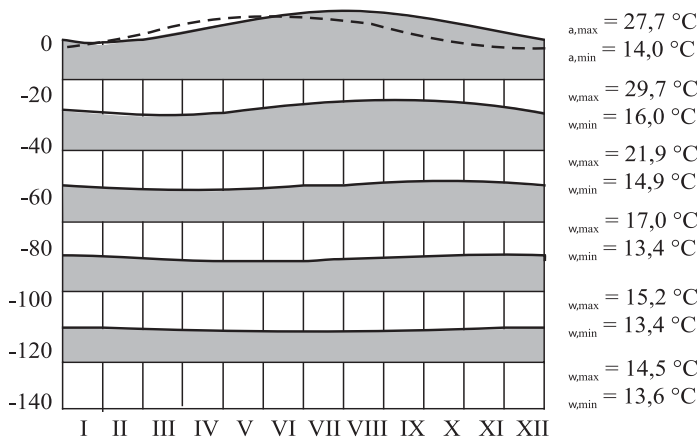


Рис. 3. Зависимости изменения во времени температуры воды в водохранилище головного гидроузла ГЭС Нам Чием



4. Среднегодовая температура воды у поверхности водохранилища $T_{w,m,t}$ считается равной полусумме максимальной и минимальной температур, т.е. $T_{w,m,t} = 0,5 (T_{w,max,t} + T_{w,min,t})$.

5. Среднегодовая температура воды у дна водохранилища $T_{w,m,b}$ принимается равной минимальной среднемесячной температуре воздуха, но не менее $4\text{ }^\circ\text{C}$ с учетом того обстоятельства, что плотность воды при температуре, равной $4\text{ }^\circ\text{C}$, является максимальной.

6. Считается, что изменение температуры воды у поверхности водохранилища $T_{w,t}$ во времени происходит в соответствии с законом гармонических колебаний, имеющих период $t_{p,os}$, равный одному году (т.е. $t_{p,os} = 1$ год).

7. Учитывается смещение по фазе колебаний температуры поверхности воды в водохранилище по сравнению с колебаниями температуры воздуха $\Delta t_{w,a}$. Значение этого смещения может быть принято равным $\Delta t_{w,a} = (1...1,5)$ месяца.

8. Рассматривается ежегодно повторяющийся, так называемый псевдостационарный, термический режим водохранилища, который формируется под влиянием ежегодно повторяющихся изменений температуры воздуха.

Перечисленные предпосылки позволяют построить решение поставленной задачи, которое дает возможность определять изменяющиеся во времени и по глубине температуры воды в водохранилище.

Основные зависимости. При выводе основных зависимостей необходимо иметь в виду, что температура воды в водохранилище T_w является функцией двух величин: координаты y , которая представляет собой глубину погружения под уровень водохранилища рассматриваемой точки, и времени t , отсчитываемого от начала года, т. е. $T_w = T_w(y, t)$. Выражение для определения значений T_w может быть записано в виде суммы следующих двух функций

$$T_w = T_{w,\tau} + T_{w,os}, \quad (1)$$

где $T_{w,\tau} = T_{w,\tau}(y)$ — функция среднегодовой температуры воды, зависящая только от координаты y ; $T_{w,os} = T_{w,os}(y, t)$ — функция, описывающая гармонические колебания температуры воды и зависящая как от координаты y , так и от времени t .

Перейдем к отысканию функций $T_{w,\tau} = T_{w,\tau}(y)$ и $T_{w,os} = T_{w,os}(y, t)$.

На основе анализа данных натуральных наблюдений за термическим режимом эксплуатируемых водохранилищ получено следующее эмпирическое выражение для определения функции среднегодовой температуры воды $T_{w,\tau}$ в любой точке на глубине y от поверхности водохранилища

$$T_{w,\tau} = T_{w,m,b} + (T_{w,m,t} - T_{w,m,b}) [1 - \text{th}^{1,5}(\alpha_w y)]. \quad (2)$$

Значения входящих в это выражение величин среднегодовой температуры воды у поверхности водохранилища $T_{w,m,t}$ и среднегодовой температуры воды у дна водохранилища $T_{w,m,b}$ принимаются согласно изложенным выше предпосылкам 4 и 5. Величина α_w представляет собой параметр, характеризующий скорость изменения среднегодовой температуры воды по глубине водохранилища. Значение этого параметра может быть принято равным $\alpha_w = 0,025$ 1/м.

Для определения функции, описывающей гармонические колебания температуры воды $T_{w,os}$, воспользуемся часто применяемым решением одномерной задачи теории теплопроводности о распространении тепловых волн в полуплоскости [3, 4, 11 и др.]. При этом будем считать, что на поверхности водохранилища задана зависящая от времени t гармоническая функция

$$T_{w,t} = T_{w,A,t} \cos [\omega (t - t_{w,0,t})], \quad (3)$$

где ω — круговая частота колебаний, равная $\omega = 2\pi/t_{p,os}$; $t_{p,os}$ — период колебаний, который в соответствии с предпосылкой 6 равен 1 году; $T_{w,A,t}$ — амплитуда колебаний температуры поверхности воды, значение которой следует принимать равным $T_{w,A,t} = T_{w,max,t} - T_{w,m,t}$ (или $T_{w,A,t} = T_{w,m,t} - T_{w,min,t}$); $t_{w,0,t}$ — отсчитываемый от начала года момент времени, соответствующий наиболее высокой температуре поверхности воды.

Величина $t_{w,0,t}$ согласно предпосылке 7 должна учитывать смещение по фазе колебаний температуры поверхности воды в водохранилище по сравнению с колебаниями температуры воздуха. Ее значение следует принять равным $t_{w,0,t} = t_{a,0} + \Delta t_{w,a}$, где $t_{a,0}$ — момент времени, соответствующий максимальной среднемесячной температуре воздуха.

Выражение для определения функции $T_{w,os}$ может быть записано в виде

$$T_{w,os} = T_{w,A} \cos [\omega (t - t_{w,0})], \quad (4)$$

где $T_{w,A} = T_{w,A}(y)$ — амплитуда колебаний температуры воды, значения которой в точках на глубине y следует находить по формуле

$$T_{w,A} = T_{w,A,t} \exp \left(-\sqrt{\frac{\pi}{a_w t_{p,os}}} y \right), \quad (5)$$

$t_{w,0} = t_{w,0}(y)$ — отсчитываемый от начала года момент времени, который соответствует наиболее высокой температуре воды на глубине y ; значение $t_{w,0}$ может быть вычислено по формуле

$$t_{w,0} = t_{w,0,t} + \frac{y}{\omega} \sqrt{\frac{\pi}{a_w t_{p,os}}}, \quad (6)$$



α_w — температуропроводность воды, значение которой принимается с учетом турбулентной и конвективной теплопроводности равным $\alpha_w = 0,0002 \text{ м}^2/\text{с}$ [10 и др.].

Таким образом, определив значения среднегодовой температуры воды $T_{w,t}$ по формуле (2) и значения функции $T_{w,os}$, описывающей гармонические колебания температуры воды, из выражения (4), можно по формуле (1) найти значения температуры воды в водохранилище в любой точке на глубине y в любой момент времени t от начала года.

Значения максимальных $T_{w,max}$ и минимальных $T_{w,min}$ температур воды в водохранилище в точках на глубине y можно вычислить по формулам

$$T_{w,max} = T_{w,m} + T_{w,A,t} \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{a_w t_{p,os}}} y\right),$$

$$T_{w,min} = T_{w,m} - T_{w,A,t} \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{a_w t_{p,os}}} y\right). \quad (7)$$

Для примера на Рис. 2 и 3 приведены результаты расчетов температурного режима водохранилища головного гидроузла ГЭС Нам Чиен во Вьетнаме, выполненных по изложенной выше методике. Рассматривался расчетный год с максимальной амплитудой колебаний среднемесячных температур. В качестве исходных данных использовались значения максимальной $T_{a,max} = 27,7 \text{ }^\circ\text{C}$ и минимальной $T_{a,min} = 14,0 \text{ }^\circ\text{C}$ среднемесячных температур воздуха, а также значение отсчитываемого от начала года момента времени $t_{a,0} = 167,4$ сут. (примерно середина июня), соответствующего максимальной температуре воздуха.

На Рис. 2 сплошными линиями показаны зависимости температуры воды от глубины водохранилища гидроузла Нам Чиен для четырех моментов времени: 15 января, 15 апреля, 15 июля, 15 октября. Там же штрихпунктирными линиями показаны зависимости максимальных и минимальных, а также среднегодовых температур воды в водохранилище. Как видно из этих рисунков среднегодовая температура воды снижается от $22,9 \text{ }^\circ\text{C}$ у поверхности водохранилища до $14,0 \text{ }^\circ\text{C}$ у дна. Двойная амплитуда колебаний температуры воды уменьшается по глубине водохранилища от $13,7 \text{ }^\circ\text{C}$ у поверхности до $0,9 \text{ }^\circ\text{C}$ у дна.

На Рис. 3 сплошными линиями показаны зависимости температуры воды от времени в течение года на пяти глубинах: 0 м, 30 м, 60 м, 90 м и 120 м. Там же с правой стороны приведены значения максимальной и минимальной температур воды на этих глубинах. Для сравнения на этом рисунке штрихпунктирной линией показана принятая в расчете гармоническая функция колебаний температуры воздуха от времени.

Из Рис. 2 и 3 видно изменяющееся по глубине смещение по фазе колебаний температуры воды в водохранилище.

Приведенные результаты определения температур воды в водохранилище были использованы в Укргидропроекте при выполнении расчетов термонапряженного состояния арочной плотины головного гидроузла ГЭС Нам Чиен во Вьетнаме.

Выводы

1. Проанализированы факторы, влияющие на формирование температурного режима непроточных глубоких водохранилищ (глубиной более 100 м), создаваемых высокими плотинами.

2. Обоснованы основные предпосылки, которые следует учитывать при выполнении расчетов температур воды в непроточных глубоких водохранилищах.

3. Разработана методика выполнения сравнительно несложных приближенных расчетов термического режима непроточных глубоких водохранилищ.

4. Для иллюстрации применения разработанной методики приведен пример расчетов по определению изменяющихся во времени и по глубине температур воды в водохранилище головного гидроузла ГЭС Нам Чиен во Вьетнаме.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бетонные плотины* (на скальных основаниях). Учебн. пособие для вузов/М.М. Гришин и др. — М.: Стройиздат, 1975. — 352 с.
2. *ДБН В.2.4-3:2010*. Гидротехнические сооружения. Основные положения / Минрегионстрой Украины.— К.: ДП Укрархбудинформ, 2010. — 37 с.
3. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.
4. *Плятт Ш.Н.* Расчеты температурных полей бетонных гидросооружений. — М.: Энергия, 1974. — 408 с.
5. *Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А. и др.* Гидротехнические сооружения (речные). Учебник для вузов. Изд. второе испр. и дополн. М.:—Изд-во АСВ, 2011. Часть 1. — 584 с. Часть 2. — 536 с.
6. *Россинский К.И.* Термический режим водохранилищ. — М.: Наука, 1975. — 167 с.
7. *Свод правил СП 58.13330.2012*. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003 / Госстрой России. М.: Минрегион России, 2011. — 44 с.
8. *Свод правил СП-40.13330.2012*. Плотины бетонные и железобетонные. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 / Минрегион России. — М.: ФАУ "ФЦС", 2012 — 65 с.
9. *СНиП 2.02.02-85*. Плотины бетонные и железобетонные / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. 40 с.
10. *Указания по термическому расчету водохранилищ*. ВСН 46-71 / Минэнерго СССР. — Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1972 — 314 с.
11. *Фрид С.А., Левених Д.П.* Температурные воздействия на гидротехнические сооружения в условиях Севера. — Л.: Стройиздат, 1978. — 200 с.