



<https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-1-12>

УДК: 628.15:621.1

Тип статьи: оригинальная

Type of article: original

МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ ДЛЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Нейфельд Е.В., Асманкин Е.М., (✉) Ушаков Ю.А., Иванов П.А., Каргаев И.Ю., Фомин М.Б.

Оренбургский государственный аграрный университет

Оренбург, Россия

(✉) e-mail: lu6j1a159@mail.ru

Представлен метод оптимизации конструктивно-геометрических параметров с использованием «упрощенного» моделирования процесса охлаждения воды. Данный метод позволяет решать вопросы эксплуатационной технологичности в аспекте создания энерго- и ресурсосберегающих конструкций водонакопительных емкостей. В исследовании для определения размеров подземной и надземной частей водонакопительной емкости принят критерий минимальности теплопотерь и составлена математическая модель теплообмена воды с грунтом при условии его однородности и стационарности теплового режима. Установлено соотношение между высотой и радиусом подземной части при минимальности значения коэффициента теплопередачи от воды к грунту через металлическую стенку. Используя уравнение теплового баланса, найдено аналитическое выражение, определяющее температуру жидкости в надземной части для любого момента времени. На основе теории дифференциального исчисления выявлено условие минимальности темпа охлаждения воды, отдающей тепло через боковые стенки в окружающую среду и воздушное пространство под крышей емкости, что сделало возможной оптимизацию размеров ее надземной части. Определена взаимосвязь радиуса и общего объема водонапорной емкости для среднестатистических значений температуры окружающей среды и скорости ветра, зарегистрированных в регионе проведения исследований. Разработанный алгоритм метода «упрощенного» моделирования и его представление в виде блок-схемы могут быть реализованы при цифровизации расчетно-аналитических процедур для подбора конструктивно-геометрических параметров емкости по критерию минимума тепловых потерь. Графически проиллюстрированы функции радиуса и высоты подземной, а также надземной частей емкости от аргумента ее общего объема.

Ключевые слова: водонакопительная емкость, заглубление, охлаждение, моделирование, оптимизация

METHOD OF PARAMETRIC OPTIMIZATION OF HYDRAULIC STRUCTURES FOR SUBZERO TEMPERATURES

Neifel'd E.V., Asmankin E.M., (✉) Ushakov Yu.A., Ivanov P.A., Kargaev I.Yu., Fomin M.B.

Orenburg State Agrarian University

Orenburg, Russia

(✉) e-mail: lu6j1a159@mail.ru

A method for optimizing design and geometric parameters using a "simplified" simulation of the water-cooling process is presented. This method allows solving the issues of operational manufacturability in the aspect of creating energy- and resource-saving constructions of water storage tanks. In the study to determine the size of underground and above-ground parts of the water storage tank the criterion of heat loss minimization is accepted and the mathematical model of water heat exchange with the ground under the condition of its homogeneity and stationarity of the thermal regime is compiled. The relationship between the height and the radius of the underground part at the minimum

value of the heat transfer coefficient from water to the ground through the metal wall is established. Using the heat balance equation, an analytical expression is found that determines the aboveground fluid temperature for any instant of time. On the basis of the theory of differential calculus the condition of minimality of the cooling rate of water, which gives up heat through the side walls to the environment and air space under the roof of the vessel, was revealed, which made possible to optimize the size of its above-ground part. The relationship of the radius and the total volume of the water holding capacity was determined for the average values of ambient temperature and wind speed recorded in the region of the research. The developed algorithm of the method of "simplified" modeling and its representation in the form of a block diagram can be implemented at digitalization of calculation-analytical procedures for selection of structural and geometrical parameters of the vessel according to the criterion of minimum heat losses. The functions of the radius and the height of the underground and above-ground parts of the vessel from the argument of its total volume are graphically illustrated.

Keywords: water storage capacity, deepening, cooling, modeling, optimization

Для цитирования: Нейфельд Е.В., Асманкин Е.М., Ушаков Ю.А., Иванов П.А., Каргаев И.Ю., Фомин М.Б. Метод параметрической оптимизации гидросооружений для отрицательных температур // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2024. Т. 54. № 1. С. 107–117. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-1-12>

For citation: Neifel'd E.V., Asmankin E.M., Ushakov Yu.A., Ivanov P.A., Kargaev I.Yu., Fomin M.B. Method of parametric optimization of hydraulic structures for subzero temperatures. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*, 2024, vol. 54, no. 1, pp. 107–117. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-1-12>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Потребление воды производственно-технологическими объектами агропромышленного комплекса в течение суток отличается крайней неравномерностью [1, 2]. В связи с этим при эксплуатации гидросооружений целесообразно использование постоянно заполненных водонакопительных емкостей. Данные емкости создают в сетях водораспределения стабильный напор и выполняют функцию компенсации суточной дискретности режима водопотребления независимо от периодов отрицательных температур окружающей среды, в течение которых возможно образование наледи с последующим разрушением как самих емкостей, так и механизмов управления расходом воды. Актуальность данного положения подтверждена практикой эксплуатации водонакопительных емкостей в зимний период при критически низких температурах воздуха ($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$), когда во избежание обледенения и выхода из строя гидросооружения необходи-

мо регулярное обновление и перемешивание накопленной водяной массы¹. Однако в ночные часы не исключается период «нулевого» расхода, что приводит к замерзанию воды и, как следствие, к нарушению водоснабжения.

В настоящее время продолжается совершенствование водонакопительных гидросооружений, особенно в аспекте предотвращения внутриемкостного льдообразования. Предлагаемые улучшенные конструкционные решения² [3] оригинальны и интересны, но вопрос эксплуатационной технологичности, следовательно, и экономической эффективности в большинстве случаев остается открытым. Это представляет серьезное препятствие внедрению новых технических систем в технологии водоснабжения [4–9]. В связи с этим в настоящее время конструкторы проявляют особый интерес к энерго- и ресурсосберегающим способам реализации теплообменных процессов при разработке механизмов и устройств для систем водоснабжения [10–12].

¹Шаталина И.Н., Трегуб Г.А. Ледовые проблемы строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений монография. СПб.: ВНИИГ, 2013. 451 с.

²Пат. № 2446262С2 Российская Федерация, МПК Е 04 Н 12/30 (2006.01) / В.Г. Петько, А.Б. Рязанов. Водонапорная башня; № 2010111539; заявл. 25.03.2010; опубл. 27.03.2012.

Одним из подходов к энергосбережению является частичное заглубление водонакопительной емкости в опорный грунт³ [13], поскольку достоверным является тот факт, что наличие подземной части емкости благодаря сокращению темпа охлаждения воды будет способствовать повышению ее устойчивости к обледенению.

Анализ теоретических исследований показал, что вопрос о размерных характеристиках подземной и надземной частей гидросооружения в последнее время не актуализируется как исследовательский. В связи с этим отсутствуют методики расчета соответствующих конструктивных параметров, но суть практической необходимости и теоретической ценности обеспечения льдоустойчивости водонакопительных емкостей является мотивационным импульсом к созданию основ теоретической базы проектных работ в данном направлении.

Цель исследования – обосновать метод оптимизации конструктивно-геометрических характеристик водонакопительных емкостей заглубленного типа с функцией минимизации теплопотерь в периоды отрицательных температур окружающего воздуха.

В основу анализа положен фрагмент эксплуатационного состояния цилиндрической емкости с конструктивно-геометрическими параметрами, на основе которых осуществлено моделирование процесса охлаждения воды для режима минимальных теплопотерь.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В предлагаемом методе для учета влияния теплофизических параметров подземной части гидросооружения на общую функциональную схему теплообмена предполагается дифференцированный анализ надземной и подземной частей башни, представляющих собой емкости цилиндрической формы (см. рис. 1).

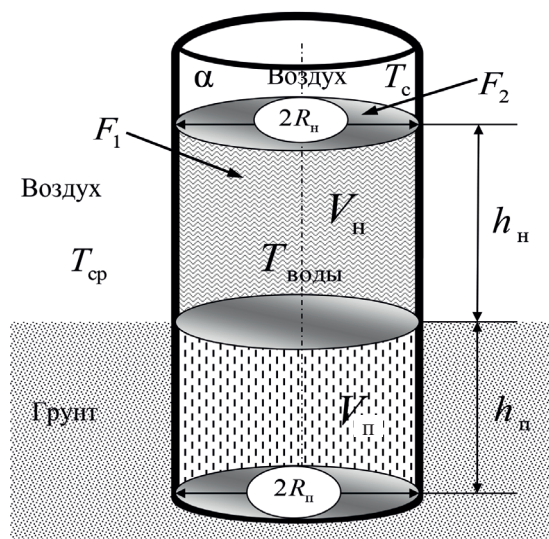


Рис. 1. Расчетная схема для водонакопительной емкости невысотного типа с надземной и подземной частями гидросооружения

Fig.1. Calculation scheme for a low-rise water storage tank with above-ground and underground parts of a hydraulic structure

Процедура математического моделирования процесса теплообмена между водой и грунтом в подземной части емкости основана на следующих допущениях:

- грунтовый массив вокруг емкости является однородным и его температурное поле стационарно;
- изменение температуры от поверхности грунта до уровня основания подземной части будет приниматься равным среднестатистическим значениям, определяемым по климатологическим таблицам рассматриваемого региона⁴.

В связи с нестабильностью температурного состояния грунта на небольшой глубине, особенно в зимний период, критерием оптимальности подземной части допустимо считать сохранение в ней максимального температурного уровня воды: ее оптимальные размеры должны соответствовать условию минимума по значению коэффициента теплопередачи между водой и грунтом.

³Asmankin E., Ushakov Yu., Shakhov V., Kargaev I., Neifeld E. Experience and Prospects for the Development of Water Pressure Tanks // AIP Conference Proceedings ICMTMTE 2021: AIP Publishing, USA, 2022. 7 p.

⁴Волков М.М., Михеев А.Л., Конев К.А. Справочник работника газовой промышленности: монография. М.: Недра, 1989. 144 с.

Если подземную часть емкости представить в виде вертикального цилиндра в полуограниченном массиве, то в этом случае коэффициент теплопередачи вычисляется по формуле⁵ (см. рис. 1)

$$k_{гр} = 2\pi h_n \lambda_{гр} / \ln \frac{2h_n}{R_n}, \quad (1)$$

где $k_{гр}$ – коэффициент теплопередачи подземной части емкости, Вт/(м² · °С); h_n – высота подземного цилиндра, м; $\lambda_{гр}$ – коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м · °С); R_n – радиус подземного цилиндра, м.

Равенство (1) следует рассматривать как зависимость коэффициента теплопередачи от высоты подземного цилиндра при постоянстве других параметров. В результате дифференцирования данной функции определяется условие минимальности коэффициента $k_{гр}$:

$$\begin{aligned} k'_{гр}(h_n) &= \left(\frac{2\pi h_n \lambda_{гр}}{\ln \frac{2h_n}{R_n}} \right)' = \\ &= \frac{2\pi \lambda_{гр} \cdot \ln \frac{2h_n}{R_n} - 2\pi h_n \lambda_{гр} \cdot \frac{R_n}{2h_n} \cdot \frac{2}{R_n}}{\ln^2 \frac{2h_n}{R_n}} = \\ &= \frac{2\pi \lambda_{гр} \left(\ln \frac{2h_n}{R_n} - 1 \right)}{\ln^2 \frac{2h_n}{R_n}}. \end{aligned} \quad (2)$$

По необходимому условию экстремума с помощью математических операций определяется стационарная точка:

$$\ln(2h_n / R_n) - 1 = 0, \text{ т.е. } h_n = eR_n / 2, \quad (3)$$

при переходе через которую знак производной меняется с минуса на плюс.

Следовательно, функция $k_{гр}(h_n)$ достигает минимума, а полученное соотношение делает возможной оптимизацию размеров подземной части гидросооружения.

Для анализа надземной части гидросооружения метод подразумевает работу с ее упрощенной моделью формализации, где принимаются следующие условия (см. рис. 1):

– стенки резервуара являются исключительно теплопередающей средой и не участвуют в процессе охлаждения своим теплосодержанием;

– тепловой поток через нижнее основание надземной части не учитывается в связи со стабильным температурным состоянием разделяющего слоя;

– площадь охлаждаемой поверхности F надземной части складывается из площади боковой поверхности цилиндра F_1 и площади круга F_2 (см. рис. 1).

Для реализации расчетно-аналитических процедур теплового состояния функционирующего резервуара необходимо оперировать температурными показателями воды в любой момент времени. Предлагаемый метод предусматривает построение математической модели процесса охлаждения воды в резервуаре, которое основывается на уравнении теплового баланса исследуемой функциональной системы, выражающем закон сохранения и превращения энергии. При моделировании учитывали, что изменение теплосодержания воды в надземной части емкости происходит за счет оттока тепла через боковые стенки и воздушное пространство под крышей резервуара, что является следствием конвективного теплообмена между водой и воздухом в совокупности с затратами тепла на испарение.

Соответственно уравнение теплового баланса примет вид

$$\Delta Q = -Q_{бок} - Q_k - Q_{и}, \quad (4)$$

где ΔQ – изменение теплосодержания надземной части воды при изменении температуры на величину dT , Дж; $Q_{бок}$ – абсолютная величина оттока тепла от воды к воздуху через боковые стенки резервуара за промежуток времени dt , Дж; Q_k – тепло, которое отдается в процессе конвективного теплообмена с воздухом за dt , Дж; $Q_{и}$ – теплота испарения воды в воздушное пространство под крышей емкости за тот же промежуток времени dt , Дж.

Дальнейшее исследование направлено на определение температуры воды в емкости для любого момента времени эксплуатации,

⁵Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена: монография. М.: Наука, 1970. 660 с.

но в этом случае необходимо рассмотреть составляющие теплового баланса.

В левой части равенства (4) расчет изменения собственной теплоты воды производится по формуле

$$\Delta Q = V_{\text{н}} \rho c dT, \quad (5)$$

где $V_{\text{н}}$ – объем воды надземной части резервуара, м^3 ; c – теплоемкость воды, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В правой части уравнения (4) вычисляется количество отданной теплоты от воды к воздуху через разделяющую твердую стенку:

$$Q_{\text{бок}} = k_{\text{возд}} F_1 (T - T_{\text{ср}}) dt, \quad (6)$$

где $k_{\text{возд}}$ – коэффициент теплопередачи через боковые стенки надземной части резервуара, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; F_1 – площадь боковой поверхности надземной части резервуара, м^2 ; T – температура воды в данный момент времени, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; t – время, с.

На основании эмпирического закона Ньютона о величине конвективного теплообмена между поверхностью воды и воздухом в расчетно-аналитический алгоритм предлагаемого метода было введено равенство

$$Q_{\text{к}} = \alpha F_2 (T - T_{\text{с}}) dt, \quad (7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от поверхности воды к воздуху в зоне воздушного пространства за счет конвекции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; F_2 – площадь водной поверхности под крышей резервуара, м^2 ; $T_{\text{с}}$ – температура воздуха над поверхностью воды в емкости, которая принимается равной средней между температурами окружающей среды и воды в резервуаре, $^\circ\text{C}$.

В результате алгебраических преобразований с учетом условия для $T_{\text{с}}$ получается уравнение

$$\begin{aligned} Q_{\text{к}} &= \alpha F_2 (T - T_{\text{с}}) dt = \\ &= \alpha F_2 \left(T - \frac{T + T_{\text{ср}}}{2} \right) dt = \alpha F_2 \left(\frac{T - T_{\text{ср}}}{2} \right) dt = \\ &= \frac{\alpha}{2} F_2 (T - T_{\text{ср}}) dt, \end{aligned} \quad (8)$$

характеризующее конвективный теплообмен.

В соответствии с предлагаемым методом, хотя и допускается вычисление затрат тепла на испарение по эмпирическим формулам, но поскольку количество отданного тепла на испарение зависит от тех же факторов, что и при конвективном теплообмене⁶, в приближенной модели можно предполагать и считать, что $Q_{\text{и}} \approx Q_{\text{к}}$.

Таким образом, уравнение теплового баланса надземной части емкости принимает вид

$$\begin{aligned} V_{\text{н}} \rho c dT &= \\ &= -k_{\text{возд}} F_1 (T - T_{\text{ср}}) dt - 2 \cdot \frac{\alpha}{2} F_2 (T - T_{\text{ср}}) dt. \end{aligned} \quad (9)$$

После алгебраического упрощения уравнение (9) приводится к форме

$$-(k_{\text{возд}} F_1 + \alpha F_2) (T - T_{\text{ср}}) dt = V_{\text{н}} \rho c dT. \quad (10)$$

Уравнение (10) является дифференциальным с разделяющимися переменными (время t – аргумент, T – функция, зависящая от времени), которое после их разделения преобразуется в равенство

$$\frac{dT}{T - T_{\text{ср}}} = - \frac{(k_{\text{возд}} F_1 + \alpha F_2) dt}{V_{\text{н}} \rho c}. \quad (11)$$

Интегрирование обеих частей (11)

$$\int \frac{dT}{T - T_{\text{ср}}} = - \int \frac{(k_{\text{возд}} F_1 + \alpha F_2) dt}{V_{\text{н}} \rho c} \quad (12)$$

окончательно дает уравнение

$$\ln|T - T_{\text{ср}}| = - \frac{k_{\text{возд}} F_1 + \alpha F_2}{V_{\text{н}} \rho c} t + C. \quad (13)$$

Для однозначного определения зависимости между указанными переменными необходимо задать начальные условия. Если в начальный момент времени температура воды в надземной части гидросооружения была везде одинаковой и равна T_0 , т.е. при $t = 0$ $T = T_0$, то далее можно определить постоянную интегрирования $C = \ln|T_0 - T_{\text{ср}}|$ и после преобразований по свойству логарифмов равенство приобретает вид

⁶Готлиб Я.Л., Жидких В.М., Сокольников Н.М. Тепловой режим водохранилищ гидроэлектростанций: монография. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 204 с.

$$\ln \left| \frac{T - T_{\text{cp}}}{T_0 - T_{\text{cp}}} \right| = - \frac{k_{\text{возд}} F_1 + \alpha F_2}{V_{\text{н}} \rho c} t. \quad (14)$$

Потенцирование обеих частей равенства (14) дает соотношение

$$T = T_{\text{cp}} + (T_0 - T_{\text{cp}}) \cdot e^{\frac{(k_{\text{возд}} F_1 + \alpha F_2) t}{c \rho V_{\text{н}}}}, \quad (15)$$

позволяющее определить температуру T воды в любой момент времени.

Полученная зависимость между температурой воды в надземной части емкости и температурами окружающей среды, а также температурыми воды в начальный момент времени, коэффициентами теплопередачи и теплоотдачи, размерами цилиндра и временем охлаждения позволяет поставить условие минимальности тепловых потерь. При этом следует считать постоянными величинами временной интервал нулевого потребления t , теплоемкость и плотность воды.

В этом случае минимуму соответствует дробь $\frac{k_{\text{возд}} F_1 + \alpha F_2}{V_{\text{н}}}$. По известным формулам, для площади боковой поверхности цилиндра $F_1 = 2\pi R_{\text{н}} h_{\text{н}}$, площади «зеркала» воды $F_2 = \pi R_{\text{н}}^2$ и объема цилиндрического тела $V_{\text{н}} = \pi R_{\text{н}}^2 h_{\text{н}}$ формализуется соотношение

$$\begin{aligned} \frac{k_{\text{возд}} F_1 + \alpha F_2}{V_{\text{н}}} &= \\ &= \frac{k_{\text{возд}} \cdot 2\pi R_{\text{н}} h_{\text{н}} + \alpha \cdot \pi R_{\text{н}}^2}{\pi R_{\text{н}}^2 h_{\text{н}}} = \\ &= \frac{2k_{\text{возд}}}{R_{\text{н}}} + \frac{\alpha}{h_{\text{н}}} = \frac{2k_{\text{возд}}}{R_{\text{н}}} + \frac{\alpha \cdot \pi R_{\text{н}}^2}{V_{\text{н}}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Как правило, техническими условиями задается постоянное значение объема надземной части цилиндра $V_{\text{н}}$, следовательно, можно утверждать, что выражение (16) зависит только от одной переменной – радиуса цилиндра, определение которого и есть одна из задач оптимизационного процесса.

Результатом дальнейшего решения математической задачи на нахождение экстремума функции с помощью производной

$$\begin{aligned} \left(\frac{k_{\text{возд}} F_1 + \alpha F_2}{V_{\text{н}}} \right)' &= - \frac{2k_{\text{возд}}}{R_{\text{н}}^2} + \frac{\alpha \cdot 2\pi R_{\text{н}}}{V_{\text{н}}} = \\ &= \frac{2(\alpha \cdot \pi R_{\text{н}}^3 - k_{\text{возд}} V_{\text{н}})}{V_{\text{н}} R_{\text{н}}^2} \end{aligned} \quad (17)$$

является выражение, которое приравнивается к нулю для нахождения стационарных точек

$$\alpha \cdot \pi R_{\text{н}}^3 - k_{\text{возд}} V_{\text{н}} = 0,$$

$$\text{т.е. } R_{\text{н}} = \sqrt[3]{k_{\text{возд}} V_{\text{н}} / (\alpha \pi)}. \quad (18)$$

С учетом соотношения между объемом и высотой надземной части водонакопительной емкости получается искомое уравнение

$$h_{\text{н}} = R_{\text{н}} \alpha / k_{\text{возд}}, \quad (19)$$

определяющее ее оптимальные размеры при минимизации теплотерь.

В случае отсутствия дополнительных условий устанавливается связь между общим объемом емкости и радиусом ее надземной части.

Понятно, что общий объем водонапорной башни складывается из суммы объемов надземной $V_{\text{н}}$ и подземной $V_{\text{п}}$ ее частей

$$V = V_{\text{н}} + V_{\text{п}}. \quad (20)$$

Для создания конструкции с минимальными тепловыми потерями в проектных расчетах учитываются равенства (3) и (22), а также формула для объема цилиндра, позволяющие формализовать соотношение при заданном общем объеме:

$$\begin{aligned} V &= \pi R_{\text{н}}^2 h_{\text{н}} + \pi R_{\text{п}}^2 h_{\text{п}} = \\ &= \pi \cdot R_{\text{н}}^2 \cdot R_{\text{н}} \cdot \frac{\alpha}{k_{\text{возд}}} + \pi \cdot R_{\text{п}}^2 \cdot \frac{e R_{\text{п}}}{2} = \\ &= \frac{\pi \alpha}{k_{\text{возд}}} R_{\text{н}}^3 + \frac{\pi e}{2} R_{\text{п}}^3. \end{aligned} \quad (21)$$

Для построения упрощенной модели процесса охлаждения гидросооружения принимается $R_{\text{н}} = R_{\text{п}}$. Тогда

$$V = \frac{\pi\alpha}{k_{\text{возд}}} R_{\text{п}}^3 + \frac{\pi e}{2} R_{\text{п}}^3 = \pi \left(\frac{\alpha}{k_{\text{возд}}} + \frac{e}{2} \right) R_{\text{п}}^3 = \frac{\pi(2\alpha + ek_{\text{возд}}) R_{\text{п}}^3}{2k_{\text{возд}}}. \quad (22)$$

Конечный искомый результат представлен формулой

$$R_{\text{п}} = \sqrt[3]{\frac{2k_{\text{возд}} V}{\pi(2\alpha + ek_{\text{возд}})}}, \quad (23)$$

являющейся квинтэссенцией метода с использованием упрощенной функциональной модели при определении, а также дальнейшей оптимизации параметрических характеристик (в представленном варианте радиус $R_{\text{общ}} = R_{\text{н}} = R_{\text{п}}$) цилиндрической емкости гидросооружения при заданном техническими условиями материале ее изготовления и проектом объеме для фактически установившихся температурных показателях воздуха окружающей среды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как один из технологических вариантов, конструктивными и режимными исходными параметрами для расчета оптимальных размеров водонакопительной емкости типа являются:

- общий объем емкости $V = 10 \text{ м}^3$;
- минимум средней температуры за самый холодный зимний месяц $T_{\text{ср.мин}} = -19,3 \text{ }^\circ\text{C}$ и средняя скорость ветра зимой $v = 3,1 \text{ м/с}$, зарегистрированные в рассматриваемом регионе;
- начальная температура воды $T_0 = 4 \text{ }^\circ\text{C}$;
- толщина стальной стенки емкости $\delta = 0,005 \text{ м}$ и коэффициент теплопроводности стали $\lambda = 47 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$.

Предлагаемый метод, позволяющий определить оптимальный радиус и высоты подземной и надземной частей емкости заданного объема, представлен следующим алгоритмом действий.

1. Для практической реализации метода по параметрам окружающей среды и тепло-

физическим характеристикам металлической емкости необходимо найти значение коэффициента теплопередачи. Поскольку водонапорная емкость тонкостенная, то для его определения расчет проводится как для плоской стенки по формуле⁷

$$k_{\text{возд}} = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \quad (24)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от воды к стенке, Вт/(м² · °C); δ – толщина стенки резервуара, м; λ – коэффициент теплопроводности стальной стенки, Вт/(м · °C); α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху за счет свободной конвекции, Вт/(м² · °C).

Учитывая интервал возможных значений, в исследовании принимается $\alpha_1 = 500 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$.

При наличии ветра коэффициент теплоотдачи от металлической стенки к воздуху определяется по эмпирической зависимости⁸:

$$\alpha_2 = 5,6 + 4 \cdot v, \quad (25)$$

где v – скорость ветра, м/с.

В связи с этим формула для вычисления коэффициента теплопередачи через боковые стенки с учетом ветра приобретает вид

$$k_{\text{возд}} = 1 / \left(\frac{1}{500} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{5,6 + 4 \cdot v} \right), \quad (26)$$

по которой для исходных параметров найдено значение $k_{\text{возд}} \approx 17,34 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$.

2. В связи с невозможностью подбора эмпирической формулы по эксперименту в исследовании считается целесообразным расчет коэффициента теплоотдачи α проводить по формуле для свободной конвекции воздуха вдоль горизонтальных поверхностей⁹

$$\alpha = 2,15 \cdot \sqrt[4]{T_0 - T_{\text{с}}}, \quad (27)$$

где T_0 – начальная температура воды в резервуаре, °C; $T_{\text{с}} = (T_0 + T_{\text{ср}})/2$ – температура воздуха над поверхностью воды, °C.

При указанных исходных данных значение коэффициента теплоотдачи от поверхно-

⁷Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб и доп. М.: Энергия, 1975. 488 с.

⁸Кухлинг Х. Справочник по физике: пер. с нем. Е.М. Лейкина. 2-е изд. М.: Мир, 1985. 520 с.

⁹Мачинский А.Д. Теплопередача в строительстве. М.: ГОССТРОЙИЗДАТ, 1939. 343 с.

сти воды к воздуху в зоне воздушного пространства $\alpha \approx 3,97 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

3. По формуле (23) определяется радиус подземной и надземной частей емкости: $R_{\text{н}} = R_{\text{п}} \approx 1,26 \text{ м}$.

4. В результате расчета высота подземной части составила: $h_{\text{п}} \approx 1,71 \text{ м}$.

5. Находится объем подземной части гидросооружения: $V_{\text{п}} \approx 8,56 \text{ м}^3$.

6. Определяется объем надземной части как $V_{\text{н}} = V - V_{\text{п}} \approx 1,44 \text{ м}^3$.

7. По формуле (19) вычисляется значение высоты надземной части емкости $h_{\text{н}} \approx 2,29 \text{ м}$.

Таким образом, приведенный пример по предлагаемому варианту демонстрирует характерное соотношение высот надземной (0,29 м) и подземной (1,71 м) частей водонакопительных емкостей для обеспечения защиты от льдообразования в случае режима «нулевого» потребления воды технологическими объектами. Такое перераспределение водяной массы экономически обосновано в аспекте энергосбережения с использованием геотермальной энергии, но лабильность температурных характеристик окружающей среды приводит к необходимости внедрения автоматических систем управления водонакоплением с учетом снижения или повышения рисков перемерзания и разрушения гидросооружений. Речь идет об оперативном изменении соотношения объемов жидкости в надземной и подземной частях водонако-

пительной емкости с возможностью заполнения максимального объема, но при полном блокировании процесса образования льда в ее внутренней полости. Создание программ управления подобными системами вполне может основываться на расчетных алгоритмах, разработанных способом «упрощенного» моделирования (см. рис. 2).

В соответствии с исходными параметрами по приведенному примеру вполне достаточно программного потенциала визуализации для представления зависимости радиуса цилиндрической емкости (см. рис. 3, а), а также высот подземной (см. рис. 3, б) и надземной частей (см. рис. 3, в) гидросооружения от заданного объема при заданных значениях температуры окружающей среды и скорости ветра.

Однако данный метод позволяет также получить аналогичные зависимости для других типов водонапорных башен, скоростей и температур окружающего воздуха. На рис. 4 представлены графики для радиусов водонакопительной емкости при изменении скорости ветра в диапазоне трех значений интервала исследуемых температур окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований предложен метод, особенностью которого является проведение оптимизации конструкционно-геометрических параметров водо-

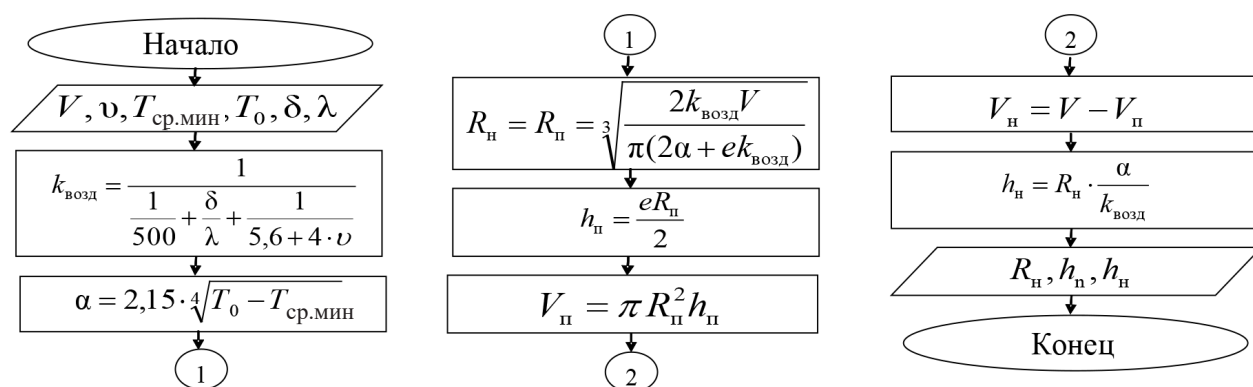
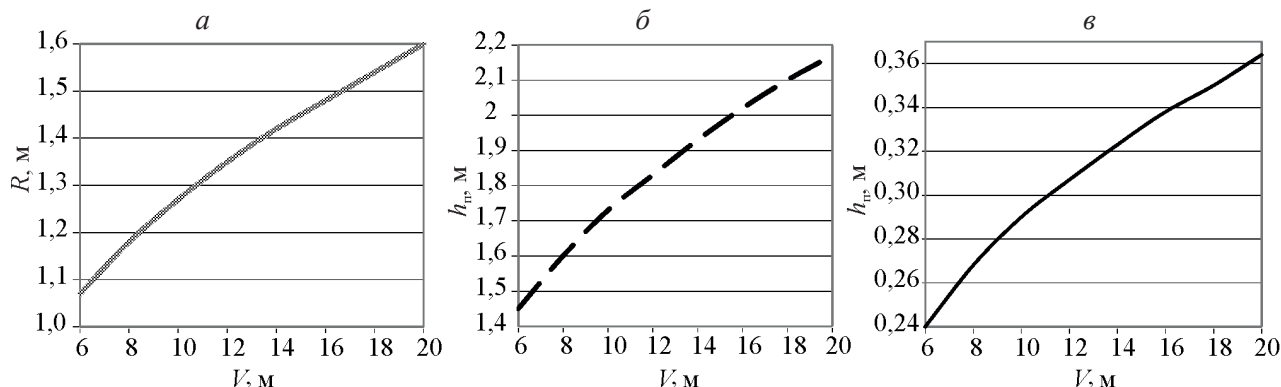


Рис. 2. Блок-схема алгоритма «упрощенной» модели расчетно-аналитического процесса для подземной и надземной частей водонакопительной емкости

Fig. 2. Block diagram of the algorithm of the "simplified" model of the calculation and analytical process for the underground and aboveground parts of the water storage tank



($T_{\text{ср. мин}} = -19,3^\circ\text{C}$, $v = 3,1 \text{ м/с}$, $T_0 = 4^\circ\text{C}$, $\delta = 0,005 \text{ м}$ и $\lambda = 47 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$).

Рис. 3. Конструктивно-геометрические параметры водонакопительной емкости в зависимости от ее общего объема, рассчитанные по минимальности тепловых потерь

Fig. 3. Structural and geometric parameters of the water storage tank depending on its total volume and calculated by the minimum heat loss

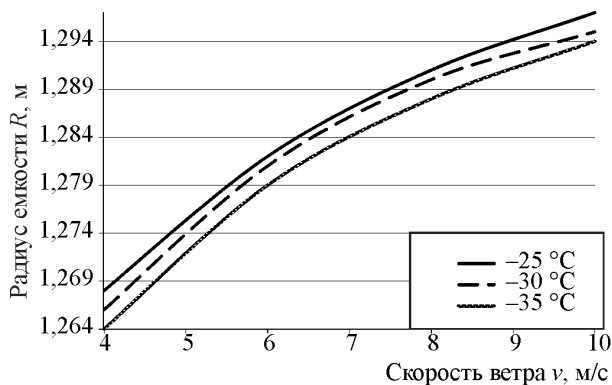


Рис. 4. Зависимость радиуса водонакопительной емкости от скорости ветра в интервале исследуемых значений температур окружающей среды

Fig. 4. Dependence of the radius of the water storage capacity on the wind speed in the range of the studied values of ambient temperatures

накопительных емкостей с использованием «упрощенных» математических моделей, предназначенных для анализа условий однородности и стационарности температурных полей окружающей среды, а также опорных грунтов, контактирующих с подземной частью емкости.

Несмотря на то, что при проектировании гидросооружений с водонакопительными емкостями вопросы прецизионности не являются приоритетными, предлагаемый способ можно развивать в аспекте цифровизации процесса подбора размеров емкостей для конкретных объемов накапливаемой жидкости,

теплофизических параметров элементов конструкции, температуры окружающей среды, а также скорости ветра. Подбор оптимального размерного соотношения функциональных элементов гидросооружения позволит технологическому объекту, эффективно используя геотермальную энергию опорных грунтов, не только работать в режиме энергосбережения, но и экономить материальный ресурс, поскольку данный способ предполагает прежде всего создание водонакопительных емкостей невысокого типа с номинальными напорными характеристиками для бытового и производственного водопотребления.

В дальнейшем не исключается возможность развития расчетно-аналитического процесса для создания программ габаритизации гидросооружений в заявленных технологических пространствах производственных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махмудова И.М. Особенности систем водоснабжения малых поселков и городов // Universum: технические науки. 2020. № 3-1 (72). С. 9–12.
2. Бартова Л.В., Бушманина Н.В., Петухова Е.О. Водоснабжение и водоотведение многофункциональных комплексов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2019.

- Т. 10. № 2. С. 92–105. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.08.
3. Рязанов А.Б., Фомин М.Б. Использование тепловой энергии грунтовых вод для предотвращения замерзания металлических водонапорных башен // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 4 (78). С. 149–150.
 4. Клемешов Д.В. Система водоснабжения и водоотведения животноводческих ферм, отдаленных от централизованных инженерных сетей // Master's Journal. 2020. № 2. С. 86–98.
 5. Поленов Д.Ю. Телеметрическая система контроля и управления водоснабжением объектов сельского хозяйства // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2020. № 2 (54). С. 58–65.
 6. Федюнина Т.В., Никушинов А.Н. Эффективность водообеспечения сельских поселений Левобережной зоны Саратовской области // International Agricultural Journal. 2023. Т. 66. № 3. С. 506–520. DOI: 10.55186/25876740_2023_7_3_1.
 7. Кизяев Б.М., Исаева С.Д. К вопросу о сельскохозяйственном водоснабжении // Мелиорация и водное хозяйство. 2020. № 3. С. 17–22.
 8. Шнейдерман И.М., Пилипенко И.В. Модернизация системы водоснабжения и водоотведения в сельской местности как фактор повышения качества жизни населения России // Народонаселение. 2023. Т. 26. № 1. С. 147–159. DOI: 10.19181/population.2023.26.1.12.
 9. Наумова О.В., Спиридонова Е.В., Катков Д.С. Устройство для водоподготовки и очистки воды // Аграрный научный журнал. 2022. № 4. С. 89–91. DOI: 10.28983/asj.y2022i4pp89-91.
 10. Судаченко В.Н., Эрк А.Ф., Тимофеев Е.В., Размук В.А., Ефимова А.Н. Роль информационных технологий в повышении энергоэффективности и экологической безопасности сельхозпроизводства Северо-Запада России // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 3 (104). С. 4–15. DOI: 10.24411/0131-5226-2020-10248.
 11. Карпов М.В., Журавлева Л.А., Жиздюк А.А., Наумова О.В., Харламова Н.А. Инновационные способы восстановления микроразрушений гидротехнических сооружений // Аграрный научный журнал. 2022. № 12. С. 77–81. DOI: 10.28983/asj.y2022i12pp77-81.
 12. Тихомиров Д.А., Трунов С.С., Ершова И.Г., Уханова В.Ю., Поручиков Д.В. Установка на возобновляемых источниках энергии для поддержания параметров микроклимата сельскохозяйственных объектов // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического университета. 2019. № 8 (99). С. 55–65.
 13. Нейфельд Е.В., Асманкин Е.М., Ушаков Ю.А., Кargaев И.Ю. Метод определения характеристик термоактивности процесса водораспределения для ёмкостей невысотного типа, эксплуатируемых в режиме отрицательных температур окружающего воздуха // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 5 (91). С. 154–158. DOI: 10.37670/2073-0853-2021-91-5-154-158.

REFERENCES

1. Makhmudova I.M. Features of water supply systems of small towns and cities. *Universum: tekhnicheskie nauki = Universum: Technical sciences*, 2020, no. 3-1 (72), pp. 9–12. (In Russian).
2. Bartova L.V., Bushmanina N.V., Petukhova E.O. Water supply and sewerage of multifunctional complexes. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura = PNRPU Bulletin. Construction and Architecture*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 92–105. (In Russian). DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.08.
3. Ryazanov A.B., Fomin M.B. Use of thermal energy of underground waters to prevent freezing towers for water of metal. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2019, no. 4 (78), pp. 149–150. (In Russian).
4. Klemeshov D.V. Water supply and sanitation system for livestock farms remote from centralized engineering networks. *Master's Journal*, 2020, no. 2, pp. 86–98.
5. Polenov D.Yu. Telemetric system of control and management of water supply of agricultural facilities. *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova = Journal of Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*, 2020, no. 2 (54), pp. 58–65. (In Russian).

6. Fedyunina T.V., Nikishanov A.N. Efficiency of water supply of rural settlements in the Left-bank zone of the Saratov region. *International Agricultural Journal*, 2023, vol. 66, no. 3, pp. 506–520. (In Russian). DOI: 10.55186/25876740_2023_7_3_1.
7. Kizyaev B.M., Isaeva S.D. To the question of agricultural water supply. *Melioratsiya i vodnoye khozyaystvo = Melioration and Water Management*, 2020, no. 3, pp. 17–22. (In Russian).
8. Shneiderman I.M., Pilipenko I.V. Upgrading water supply and wastewater collection systems in rural areas as a way to improve quality of life of the population of Russia. *Narodonaseleniye = Population*, 2023, vol. 26, no. 1, pp. 147–159. (In Russian). DOI: 10.19181/population.2023.26.1.12.
9. Naumova O.V., Spiridonova E.V., Katkov D.S. Device for water treatment and water purification. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*, 2022, no. 4, pp. 89–91. (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2022i4pp89-91.
10. Sudachenko V.N., Erk A.F., Timofeev E.V., Razmuk V.A., Efimova A.N. Role of information technologies in improving energy efficiency and environmental safety of agricultural production in the North-West of Russia. *AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering*, 2020, no. 3 (104), pp. 4–15. (In Russian). DOI: 10.24411/0131-5226-2020-10248.
11. Karpov M.V., Zhuravleva L.A., Zhizdyuk A.A., Naumova O.V., Kharlamova N.A. The impact of water and the environment on hydraulic structures and methods of restoration by bacteria which secrete calcium overgrowing microcracks. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*, 2022, no. 12, pp. 77–81. (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2022i12pp77-81.
12. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Ershova I.G., Ukhanova V.Yu., Poruchikov D.V. Installation on renewable energy sources to support microclimate parameters of agricultural objects. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo inzhenerno-ekonomicheskogo universiteta = Bulletin NGIEI*, 2019, no. 8 (99), pp. 55–65. (In Russian).
13. Neifel'd E.V., Asmankin E.M., Ushakov Yu.A., Kargaev I.Yu. Method for determining the characteristics of thermal activity of the water distribution process for low-rise tanks operated in the mode of negative ambient temperatures. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2021, no. 5 (91), pp. 154–158. (In Russian). DOI: 10.37670/2073-0853-2021-91-5-154-158.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нейфельд Е.В., кандидат педагогических наук, доцент

Асманкин Е.М., доктор технических наук, профессор

✉ **Ушаков Ю.А.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой; **адрес для переписки:** Россия, 460014, Оренбург, ул. Челюскинцев, 18; e-mail: lu6j1a159@mail.ru

Иванов П.А., кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

Каргаев И.Ю., преподаватель

Фомин М.Б., кандидат технических наук, доцент

AUTHOR INFORMATION

Elena V. Neifel'd, Candidate of Science in Pedagogy, Associate Professor

Evgeny M. Asmankin, Doctor of Science in Engineering, Professor

✉ **Yuriy A. Ushakov**, Doctor of Science in Engineering, Professor; Department Head; **address:** 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia; e-mail: lu6j1a159@mail.ru

Pavel A. Ivanov, Candidate of Science in Agriculture, Associate Professor

Ivan Y. Kargaev, Teacher

Maksim B. Fomin, Candidate of Science in Engineering, Associate Professor

Дата поступления статьи / Received by the editors 09.08.2023
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 23.11.2023
Дата публикации / Published 20.02.2024