

УДК 666.972.17

doi: 10.33622/0869-7019.2022.12.16-21

Количество льда для получения требуемой температуры бетонной смеси

Нгуен Чонг ЧЫК¹ (Вьетнам), кандидат технических наук, преподаватель-исследователь, trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn

Танг Ван ЛАМ² (Вьетнам), кандидат технических наук, преподаватель-исследователь, lamvantang@gmail.com

Борис Игоревич БУЛГАКОВ³, кандидат технических наук, доцент, bulgakovbi@mgsu.ru

Ольга Владимировна АЛЕКСАНДРОВА³, кандидат технических наук, доцент, aleksandrovaov@mgsu.ru

Надежда Алексеевна ГАЛЬЦЕВА³, кандидат технических наук, доцент, galcevana@mgsu.ru

¹ Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 236 Хоанг Куок Вьет, Ханой, Вьетнам

² Ханойский горно-геологический университет, 18 Фо Виен, Дык Тханг, Бак Ту Лиен, Ханой, Вьетнам

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. При строительстве масштабных объектов гидротехнического назначения, таких как плотины, дамбы, пилоны мостов и другие подобные сооружения, определение требуемой начальной температуры бетонных смесей в климатических условиях Вьетнама имеет важное значение. Понижение начальной температуры бетонной смеси при замене в ее составе воды льдом будет способствовать снижению риска возникновения термических трещин в твердеющих бетонных и железобетонных конструкциях. С использованием метода энергетического баланса предложена новая формула для определения количества льда, необходимого для получения требуемой начальной температуры бетонной смеси. Данную формулу можно использовать в качестве расчетной при приготовлении бетонных смесей с заданной начальной температурой. Экспериментально установлена зависимость между начальной температурой бетонной смеси и соотношением между количеством добавленного льда и водой затворения в бетонной смеси. Вид зависимости – линейный. Исследование имеет реальные перспективы практического применения в части включения предлагаемой расчетной формулы в актуализируемую версию строительного стандарта Вьетнама по бетонным и железобетонным конструкциям с учетом жаркого и влажного климата.

Ключевые слова: бетонная смесь, требуемая начальная температура, лед, трещинообразование, термические трещины, метод энергетического баланса

Для цитирования: Чык Н. Ч., Лам Т. В., Булгаков Б. И., Александрова О. В., Гальцева Н. А. Количество льда для получения требуемой температуры бетонной смеси // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 12. С. 16 – 21. doi: 10.33622/0869-7019.2022.12.16-21

THE AMOUNT OF ICE TO OBTAIN THE REQUIRED TEMPERATURE OF THE CONCRETE MIX

Nguyen Trong CHUC¹ (Vietnam), trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn, **Tang Van LAM**² (Vietnam), lamvantang@gmail.com

Boris I. BULGAKOV³, bulgakovbi@mgsu.ru, **Olga V. ALEXANDROVA**³, aleksandrovaov@mgsu.ru

Nadezhda A. GALTSEVA³, galcevana@mgsu.ru

¹ Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet Street, Hanoi, Vietnam

² Hanoi University of Mining and Geology, 18 Pho Vien, Duc Thang, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. In the construction of large-scale hydraulic engineering facilities, such as dams, dikes, bridge pylons and other structures, determining the required initial temperature of concrete mixtures in the climatic conditions of Vietnam is important. Lowering the initial temperature of the concrete mixture when mixing it in the composition of water with ice will help reduce the risk of thermal cracks in hardening concrete and reinforced concrete structures. Using the energy balance method, a new formula is proposed for determining the amount of ice required to obtain the required initial temperature of the concrete mix. This formula can be used as a calculation formula in the preparation of concrete mixtures with a given initial temperature. The experimental dependency between the initial temperature of the concrete mixture and the ratio between the amount of added ice and the mixing water in the concrete mixture has been established. The type of dependence is linear. The study has real prospects for practical application in terms of including the proposed calculation formula in the updated version of the Vietnamese building standard for concrete and reinforced concrete structures, taking into account the hot and humid climate.

Keywords: concrete mixture, required initial temperature, ice, cracking, thermal cracks, energy balance method

For citation: Chuc N. T., Lam T. V., Bulgakov B. I., Alexandrova O. V., Galtseva N. A. The Amount of Ice to Obtain the Required Temperature of the Concrete Mix. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and Civil Construction], 2022, no. 12, pp. ?? – ???. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.12.??-??

Введение

Бетон остается по-прежнему незаменимым материалом для различных видов современного строительства. Этому способствуют его долговечность, высокие прочностные и эксплуатационные показатели, а также сравнительно низкая стоимость и простота приготовления бетонной смеси. Однако бетону присущ и ряд недостатков. Основные из них — характерная для всех каменных материалов более низкая (на порядок) прочность к растягивающим усилиям по сравнению с прочностью на сжатие, а также склонность к появлению усадочных и термических трещин, особенно при твердении бетонных массивов.

Для снижения риска термического растрескивания существует немало решений, направленных на уменьшение разности температур между центром и поверхностью твердеющего бетонного блока, в том числе и за счет снижения температуры бетонной смеси. Они приведены в СП 41.13330.2012 «СНиП 2.06.08–87 Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений» (с изм. № 1) и в других нормативах [1, 2].

Важную роль играет температура используемых сырьевых материалов [3]. Кроме того, для понижения температуры бетонных смесей применяют жидкий азот и лед, что требует корректировки необходимого количества воды затворения для сохранения постоянства рекомендованного водоцементного отношения [4–9].

В исследовании [10] была показана взаимосвязь между начальной температурой бетонной смеси и максимальной температурой в массивных бетонных конструкциях, возникающей при твердении бетона: при повышении начальной температуры бетонной смеси увеличивается максимальная температура в центре твердеющего бетонного блока и наоборот. Влияние температуры бетонной смеси на максимальную температуру в бетонном блоке в ходе его твердения показано на рис. 1, из которого видно, что максимальная температура в центре твердеющего бетонного блока снижается при понижении начальной температуры бетонной смеси с 30 до 15 °С. Температура в центре твердеющего бетонного массива быстро увеличивается и достигает максимального значения через два–три дня, а затем с течением времени постепенно снижается.

В результате проведенных испытаний было установлено, что максимальная температура, достигаемая в центре бетонного блока (размер 8×6×3 м), составляет 62, 57, 53 и 48 °С при исходной температуре бетонной смеси соответственно 30, 25, 20 и 15 °С. При этом очевидно, что из-за влияния конвективных процессов температура на поверхности блока ниже, чем в его центре.

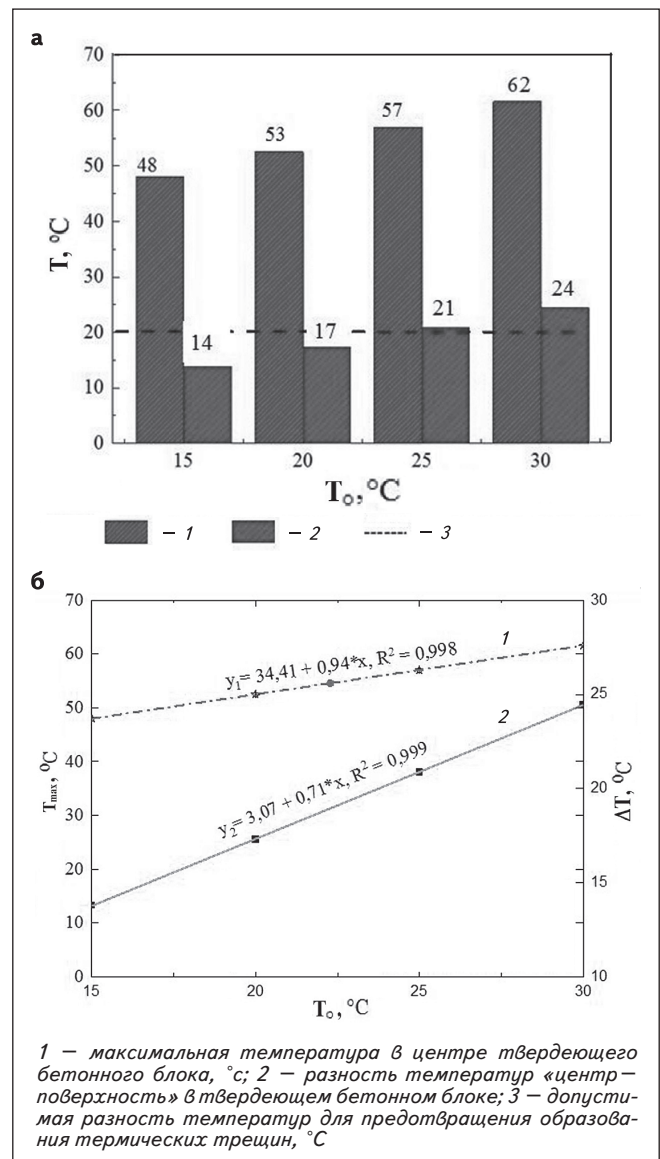


Рис. 1. Зависимость между максимальной температурой в центре твердеющего бетонного блока, температурным перепадом между центром бетонного блока и его поверхностью и начальной температурой бетонной смеси

Установлено, что взаимосвязь между максимальной температурой внутри бетонного блока и начальной температурой бетонной смеси может быть представлена линейной зависимостью (рис. 1б).

При повышении начальной температуры бетонной смеси на 1 °С максимальная температура в центре заливаемой массы также увеличивается примерно на 1 °С. Максимальную температуру y_1 можно считать функцией первого порядка, значение которой определяется по формуле

$$y_1 = 34,41 + 0,94xR^2 = 0,998, \quad (1)$$

где x — начальная температура бетонной смеси, °С; R^2 — квадрат коэффициента корреляции.

Перепад температур между центром и поверхностью бетонного блока y_2 также можно считать линейной функцией (см. рис. 16) и рассчитать с помощью уравнения

$$y_2 = 3,07 + 0,71x R^2 = 0,999. \quad (2)$$

Очевидно, что скорость роста максимального значения температуры в центре твердеющего бетонного блока и темп нарастания перепада температур различны. Но обе эти тенденции необходимо учитывать для предотвращения образования трещин в массивных бетонных конструкциях [11–14].

Определение начальной температуры бетонной смеси

В соответствии с исследованиями [13, 15–17] начальную температуру бетонной смеси T_0 можно ориентировочно вычислить:

$$T_0 = \frac{0,22(m_{Ц}T_{Ц} + m_{К}T_{К} + m_{П}T_{П}) + m_{В}T_{В}}{0,22(m_{Ц} + m_{К} + m_{П}) + m_{В}}, \quad (3)$$

где m_i – масса i -го компонента в 1 м^3 бетонной смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$; T_i – температура i -го компонента бетонной смеси, $^{\circ}\text{C}$; Ц, К, П, В – соответственно цемент, щебень, песок, вода.

Снижение температуры бетонной смеси ΔT в результате добавления льда можно найти из выражения

$$\Delta T = \frac{m_{\text{лед}} \{79,6 + (T_0 - 0)\}}{0,2(m_{Ц} + m_{К} + m_{П}) + m_{В}} E_f, \quad (4)$$

где $m_{\text{лед}}$ – масса льда, $\text{кг}/\text{м}^3$; E_f – коэффициент эффективности охлаждения, равный 0,7–0,8.

Таким образом, исходя из накопленного практического опыта можно констатировать следующее:

- приведенные выше расчетные формулы позволяют получить результаты, довольно близкие к экспериментальным, и легко определить входящие в них показатели;
- однако уравнения (3) и (4) больше подходят для бетонной смеси, находящейся в «идеальном состоянии», т. е. они не учитывают влияния таких факторов, как перемешивание сырьевых материалов при приготовлении бетонной смеси, протекающие реакции гидратации и гидролиза, а также теплопотери в окружающую среду. В результате этого экспериментально определенная температура бетонной смеси всегда несколько выше ее теоретического расчетного значения.

Следовательно, уравнения (3) и (4) не совсем корректно учитывают влияние добавления льда на снижение начальной температуры бетонной смеси при необходимости ее корректировки.

Кроме того, согласно Методике расчета количества льда, необходимого для приготовления бетон-

1. Сырьевые материалы бетонной смеси и их показатели

Сырьевые материалы	Масса, кг	Температура сырьевых материалов, $^{\circ}\text{C}$	Удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$
Цемент	$m_{Ц}$	$T_{Ц}$	$C_{Ц}$
Песок	$m_{П}$	$T_{П}$	$C_{П}$
Щебень	$m_{К}$	$T_{К}$	$C_{К}$
Вода	$\alpha m_{Ц} - X$	$T_{В}$	$C_{В}$
Лед	X	$T_{\text{лед}}$	$C_{\text{лед}}$

Примечание. α – водоцементное отношение, равное 0,3–0,45.

ной смеси заданной температуры [19] это количество определяют следующим образом:

$$W_{Ц}C_{Ц}(T_{Ц} - T_0) + W_{П}C_{П}(T_{П} - T_0) + W_{К}C_{К}(T_{К} - T_0) + W_{sm}C_{sm}(T_{sm} - T_0) + W_{am}C_{am}(T_{am} - T_0) + (W_{В} - W_i)C_{В}(T_{В} - T_0) + W_i[(T_i - 32)C_i + (32 - T_0)C_{В}] - WF = 0, \quad (5)$$

где W_i , T_i и C_i – соответственно масса, температура и удельная теплоемкость сырьевых материалов бетонной смеси ($i = Ц, П, К, В, sm, am$); T_0 – начальная температура бетонной смеси, $^{\circ}\text{C}$; $T_0 = T - \Delta t$; T – заданная температура бетонной смеси в месте укладки, $^{\circ}\text{C}$; Δt – разность температур между заданным и расчетным значениями, $^{\circ}\text{C}$; F – теплота плавления льда, $\text{кДж}/\text{кг}$; sm – свободная влага в мелком заполнителе; am – то же, в крупном заполнителе.

Однако пользоваться формулой (5) для определения количества льда, необходимого для получения требуемой начальной температуры бетонной смеси, достаточно сложно.

Определение требуемого количества льда на основании метода энергетического баланса

Рассмотрим бетонную смесь, состоящую из сырьевых материалов, показатели которых приведены в табл. 1.

Тепло, выделяемое сырьевыми материалами бетонной смеси в ходе достижения ею требуемой начальной температуры T_0 , без учета влияния тающего льда, можно рассчитать по формуле

$$Q_{\text{выдел}}^I = C[m_{Ц}(T_{Ц} - T_0) + m_{П}(T_{П} - T_0) + m_{К}(T_{К} - T_0)] + (\alpha m_{Ц} - X)C_{В}(T_{В} - T_0), \quad (6)$$

где C – удельная теплоемкость бетонной смеси, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$.

Эндотермический процесс таяния льда состоит из трех стадий:

- тепло, поглощаемое тающим льдом при повышении температуры с $T_{\text{лед}}$ до 0°C :

$$Q_1 = XC_{\text{лед}}(0 - T_{\text{лед}}); \quad (7)$$

2. Взаимосвязь между требуемой начальной температурой бетонной смеси и количеством добавленного льда

Масса, кг	Начальная температура бетонной смеси, °С									
	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12
Лед	0	12,53	24,78	36,74	48,42	59,85	71,03	81,95	92,64	103,1
Вода	175	162,65	150,22	138,26	126,58	115,15	103,97	93,05	82,36	71,9

• тепло, необходимое для расплавления X , кг, льда:

$$Q_2 = X\lambda, \quad (8)$$

где λ – удельная теплота плавления льда, равная 333,5 кДж/кг;

• тепло, требуемое для повышения температуры X , кг, растаявшего льда с 0°C до T_0 :

$$Q_3 = XC_{\text{лед}}(T_0 - 0). \quad (9)$$

Тогда общее количество поглощаемого тепла в результате добавления льда составит:

$$Q^{\text{II}} = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (10)$$

В соответствии с законом сохранения энергии имеем:

$$Q_{\text{выдел}} = Q^{\text{II}}; \quad (11)$$

$$C[m_{\text{Ц}}(T_{\text{Ц}} - T_0) + m_{\text{П}}(T_{\text{П}} - T_0) + m_{\text{К}}(T_{\text{К}} - T_0)] + (\alpha m_{\text{Ц}} - X)C_{\text{В}}(T_{\text{В}} - T_0) = XC_{\text{лед}}(0 - T_{\text{лед}}) + X\lambda + XC_{\text{лед}}(T_0 - 0). \quad (12)$$

Следовательно, количество льда, необходимое для получения требуемой начальной температуры бетонной смеси T_0 , можно определить по формуле

$$X = \frac{C[m_{\text{Ц}}(T_{\text{Ц}} - T_0) + m_{\text{П}}(T_{\text{П}} - T_0) + m_{\text{К}}(T_{\text{К}} - T_0)] + \alpha m_{\text{Ц}} C_{\text{В}}(T_{\text{В}} - T_0)}{\lambda + C_{\text{лед}}(0 - T_{\text{лед}}) + C_{\text{В}}(T_{\text{В}} - T_0)} \quad (13)$$

Проверка предлагаемой расчетной формулы

Согласно СП 41.13330 состав 1 м^3 бетонной смеси содержит:

В/Ц	0,5
цемент, кг	350
заполнители, кг	1814
лед, кг	X
вода, кг	$175 - X$

Примем, что начальная температура компонентов в бетонной смеси и температура окружающей среды имеют одинаковое значение 20°C . При понижении температуры воды до 5°C за счет добав-

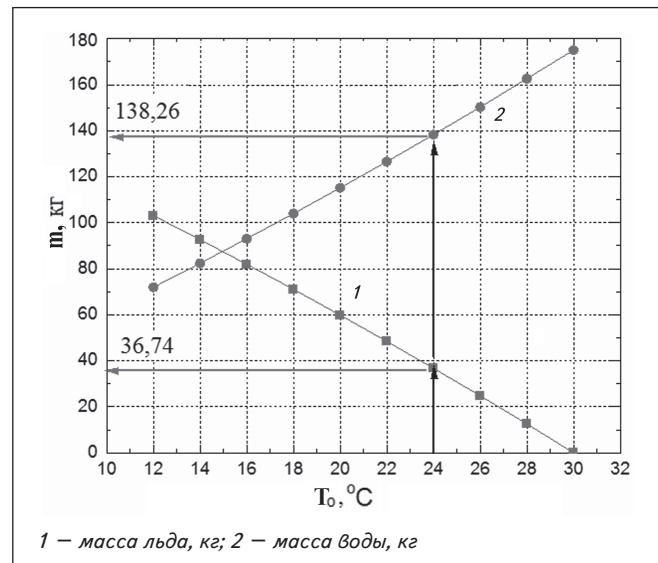


Рис. 2. График зависимости требуемой начальной температуры бетонной смеси от количества льда и воды в бетонной смеси

ления льда температура бетонной смеси снижается до 16°C .

Для определения необходимого количества льда рассмотрим уравнение теплового баланса при замене в бетонной смеси части воды с начальной температурой $T_{\text{В}} = 20^\circ\text{C}$ льдом с температурой $T_{\text{лед}} = -4^\circ\text{C}$ для снижения температуры воды затворения $T_{\text{В}}$ до 5°C :

$$XC_{\text{лед}}(T_{\text{В}}^0 - T_{\text{лед}}) + X\lambda = (175 - X)C_{\text{В}}(T_{\text{В}} - T_{\text{В}}^0), \quad (14)$$

где $T_{\text{В}}^0$ – температура воды, полученная после смешивания X , кг, льда.

Учитывая удельные теплоемкости: воды $C_{\text{В}} = 4,19$ кДж/(кг·°C), льда $C_{\text{лед}} = 2,05$ кДж/(кг·°C) и бетонной смеси $C = 0,84$ кДж/(кг·°C), а также удельную теплоту плавления льда $\lambda = 333,5$ кДж/кг, получим необходимую массу льда $X = 26,22$ кг. Далее, используя найденную массу льда и приведенные выше данные, с помощью уравнения (13) определим:

$$26,22 = \frac{0,2[350(20 - T_0) + 1814(20 - T_0)]}{81,23 + 0,43(T_0 - (-4)) + 1(20 - T_0)} + \frac{0,5 \cdot 350 \cdot 1(20 - T_0)}{81,23 + 0,43(T_0 - (-4)) + 1(20 - T_0)}. \quad (15)$$

Решая уравнение (15), вычислим начальную температуру бетонной смеси $T_0 = 15,95$ °С.

Следовательно, проведенная проверка расчетной формулы (13) показала ее адекватность.

Взаимосвязь начальной температуры бетонной смеси с количеством добавленного льда

Используя состав бетонной смеси, приведенный в работе [18], и предположив, что температура окружающей среды во Вьетнаме летом колеблется около 30 °С, были проведены расчеты с целью установления взаимосвязи между начальной температурой бетонной смеси и количеством добавленного льда взамен части воды затворения, результаты которых представлены в *табл. 2*.

Установленная взаимосвязь между начальной температурой бетонной смеси и количеством льда и воды в бетонной смеси показана *рис. 2*. Как видно из данного рисунка, взаимосвязь между требуемой начальной температурой бетонной смеси и количеством воды и льда имеет линейный вид. При этом для получения более низкой температуры бе-

тонной смеси следует увеличить количество льда и в соответствии с этим сократить количество воды затворения.

Выводы

1. На основании метода энергетического баланса предложена расчетная формула для определения количества льда, необходимого для замены части воды затворения для сохранения установленного В/Ц, с целью получения бетонной смеси с требуемой начальной температурой. Проведенная проверка формулы показала ее адекватность.

2. Следует продолжить экспериментальные исследования для дополнительной проверки правильности полученной расчетной формулы с целью ее включения в актуализированную версию строительного стандарта Вьетнама TCVN 9345:2012 по бетонным и железобетонным конструкциям с учетом технических мероприятий по предотвращению образования трещин под действием жаркого влажного климата [14].

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. ACI 207.1R-96. Mass concrete [Бетонные массивы].
2. ACI 207. 1R-05. Guide to mass concrete [Руководство по бетонным массивам]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
3. Aniskin N., Chuc N. T. Temperature regime of massive concrete dams in the zone of contact with the base [Температурный режим массивных бетонных плотин в зоне контакта с основанием]. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, no. 365, 12 p.
4. Barbara K., Maciej B., Maciej P., Aneta Z. Analysis of cracking risk in early age mass concrete with different aggregate types [Анализ риска образования трещин в монолитном бетоне раннего возраста с различными типами заполнителей]. *Procedia Engineering*, 2017, no. 193, pp. 234–241.
5. Ляпичев Ю. П. Проектирование и строительство современных высоких плотин. М. : Изд-во РУДН, 2004. 274 с.
5. Lyapichev Yu. P. *Proektirovanie i stroitel'stvo sovremennykh vysokikh plotin* [Design and construction of modern high dams]. Moscow, RUDN Publ., 2004. 274 p. (In Russ.).
6. Aniskin N., Nguyen T. C., Bui A. K. The use of ice to cool the concrete mix in the construction of massive structures [Использование льда для охлаждения бетонной смеси при возведении массивных конструкций]. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 264, 8 p.
7. ACI Committee 207. Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete [Отчет о влиянии изменения температуры и объема на растрескивание бетонного массива].
8. Zhu Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [Термические напряжения и регулирование температуры бетонного массива]. 2014. 500 p.
9. Гинзбург С. М., Корсакова Л. В., Павленко Н. В. Расчетные исследования термонапряженного состояния плотин из укатанного бетона // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2007. № 248. С. 86–93.
9. Ginzburg S. M., Korsakova L. V., Pavlenko N. V. Computational studies of the thermally stressed state of rolled concrete dams. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva*, 2007, no. 248, pp. 86–93. (In Russ.).
10. Bui An Kiet, Nguyen Trong Chuc. Influence of the initial temperature of the concrete mixture on the temperature field in mass concrete [Влияние начальной температуры бетонной смеси на температурное поле в насыпном бетоне]. *Construction Magazine*, 2020, iss. 2, pp. 3–6. (In Viet.).
11. Tressa K., Kavitha P. E., Bennet K. Numerical analysis of temperature distribution across the cross section of a concrete dam during early ages [Численный анализ распределения температуры по поперечному сечению бетонной плотины в ранних возрастах]. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2013, no. 1, pp. 26–31.
12. Крат Т. Ю., Рукавишников Т. Н. Оценка температурного режима и термонапряженного состояния блоков водослива при различных условиях бетонирования // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2007. № 248. С. 77–85.
12. Krat T. Yu., Rukavishnikova T. N. Assessment of the temperature regime and the thermally stressed state of the spillway blocks under various concreting conditions. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva*, 2007, no. 248, pp. 77–85. (In Russ.).

13. Adrian M. L. *A finite element model for the prediction of thermal stresses in mass concrete* [Модель конечных элементов для прогнозирования термических напряжений в бетонном массиве]. University of Florida, 2009. 177 p.
14. TCVN 9345:2012. Concrete and reinforced concrete structures - Guide on technical measures for prevention of cracks occurred under the action of hot humid climate. [Бетонные и железобетонные конструкции. Руководство по техническим мероприятиям по предотвращению образования трещин под действием жаркого влажного климата]. 2012. 15 p. (In Viet.).
15. Bingqi L., Zhenhong W., Yunhui J. Z. Z. Temperature control and crack prevention during construction in steep slope dams and stilling basins in high-altitude areas [Температурный режим и предотвращение трещин при строительстве крутосклонных плотин и водосборников в высокогорных районах]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, no. 10, pp. 1–15.
16. Le Q. T., Vu T. T., Vu H. H. Building the thermal and stress stresses of a roller compacted gravity dam in Vietnam using ANSYS software [Расчет термических и стрессовых напряжений в роlikоуплотненной гравитационной плотине с использованием программного обеспечения ANSYS во Вьетнаме]. *Journal of Water Resources and Environmental Sciences*, 2015, no. 50, pp. 25–33.
17. Kim S. G. *Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement* [Влияние тепловыделения при гидратации цемента на укладку бетонного массива]. Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University. 2010. 179 p.
18. Klemczak B., Jędrzejewska A. Early age thermal and shrinkage cracks in concrete structures – influence of curing conditions [Ранние термические и усадочные трещины в бетонных конструкциях – влияние условий твердения]. *Architecture Civil Engineering Environment*, 2011, no. 2, pp. 35–48.
19. CRD-C 307-91. *Method for calculating the amount of ice needed to produce mixed concrete of a specified temperature* [Методика расчета количества льда, необходимого для приготовления бетонной смеси заданной температуры]. 1991. 2 p. ■