

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.03

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.371-380

Применение ингибиторов тепла гидратации цемента для борьбы с термическим трещинообразованием в массивных бетонных конструкциях

Нгуен Чонг Чык¹, Хоанг Куок Лонг¹, Ле Ван Хунг¹, Николай Алексеевич Анискин²

¹ Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куи Дона; г. Ханой, Вьетнам;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема температурного трещинообразования вследствие гидратации цемента в массивных бетонных конструкциях привлекает внимание многих отечественных и зарубежных ученых. В настоящее время существует множество мероприятий по предотвращению образования температурных трещин при твердении бетона. Можно разделить их на два основных класса. Первый — это технологические мероприятия в процессе строительства. Второе направление связано с оптимизацией состава бетона, в том числе с использованием различных добавок. Одним из видов таких добавок являются ингибиторы тепловыделения цемента. Их использование позволяет снизить тепловыделение от гидратации цемента на ранней стадии твердения бетона. Это в значительной мере снижает риск образования температурных трещин. Метод — достаточно новый и полностью не исследован на сегодняшний день.

Материалы и методы. На основе метода конечных элементов (МКЭ) выполнена оценка влияния добавки ингибитора понижения тепла гидратации цемента (ИПТ) на вероятность образования термических трещин при бетонировании массивных бетонных конструкций. Выполнены расчеты температурного режима и термонапряженного состояния бетонного массива после его возведения. Рассматривались два варианта состава бетонной смеси: обычный состав без использования ингибитора и состав с добавлением ингибитора тепла гидратации. Численные исследования проведены на базе МКЭ с применением программного комплекса Midas Civil 2019.

Результаты. В результате численных решений для двух вариантов составов бетона получено распределение температуры и температурных напряжений в возведенном бетонном массиве. Дана оценка риска температурного трещинообразования.

Выводы. Ингибиторы понижения теплоты гидратации эффективны для снижения температуры гидратации в массивных бетонных конструкциях. При добавлении 1 % ИПТ от веса цемента при строительстве массивных бетонных конструкций значительно снижается риск появления термических трещин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ингибитор понижения температуры (ИПТ), максимальная температура, температурное поле, бетонный массив, гидратация цемента, температурная трещина

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чык Н.Ч., Лонг Х.К., Хунг Л.В., Анискин Н.А. Применение ингибиторов тепла гидратации цемента для борьбы с термическим трещинообразованием в массивных бетонных конструкциях // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 371–380. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.371-380

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Анискин, aniskin@mgsu.ru.

Application of cement hydration heat inhibitors to control thermal cracking in massive concrete structures

Nguyen Trong Chuc¹, Hoang Quoc Long¹, Le Van Hung¹, Nikolay A. Aniskin²

¹ Le Quy Don Technical University; Hanoi, Vietnam;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The problem of temperature cracking due to cement hydration in massive concrete structures attracts the attention of many domestic and foreign scientists. At present, there are many measures to prevent the formation of tempera-

ture cracks during concrete hardening. It is possible to divide them into two main classes. The first one is technological measures in the process of construction. The second direction is related to the optimization of concrete composition, including the use of various additives. One type of such additives are cement heat release inhibitors. Their use makes it possible to reduce heat release from cement hydration at the early stage of concrete hardening. This greatly reduces the risk of thermal cracking. The method is quite new and has not been fully investigated to date.

Materials and methods. In this work, the influence of cement hydration heat inhibitor addition on the probability of thermal cracks formation during the concreting of massive concrete structures was evaluated using the finite element method. Calculations of the temperature regime and thermal stress state of the concrete mass after its erection were carried out. Two variants of concrete mixture composition were considered: the usual composition — without the use of inhibitor and the composition with the addition of heat of hydration inhibitor. Numerical studies were carried out on the basis of the finite element method using the Midas civil 2019 software package.

Results. As a result of numerical solutions for two variants of concrete compositions, the distribution of temperature and temperature stresses in the erected concrete mass was obtained. The risk assessment of temperature cracking is given.

Conclusions. Heat of hydration reduction inhibitors are effective in reducing the hydration temperature in massive concrete structures. The addition of 1 % TRI of cement weight in massive concrete structures significantly reduces the risk of thermal cracking.

KEYWORDS: Temperature reduction inhibitor (TRI), maximum temperature, temperature field, concrete mass, cement hydration, temperature crack

FOR CITATION: Chuc N.T., Long H.Q., Hung L.V., Aniskin N.A. Application of cement hydration heat inhibitors to control thermal cracking in massive concrete structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):371-380. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.371-380 (rus.).

Corresponding author: Nikolay A. Aniskin, aniskin@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Массивными бетонными конструкциями в соответствии с определением¹ называют конструкции, для которых отношение поверхности, открытой для ее высыхания, м², к ее объему, м³, равно или меньше 2. По определению Американского института бетона² массивной следует считать любую конструкцию с размерами достаточно большими, чтобы принимать во внимание величину выделившегося тепла при гидратации цемента для минимизации образования температурных трещин. На практике массивной бетонной конструкцией считают такую, в которой объем уложенного в опалубку бетона хотя бы в одном направлении имеет геометрический размер не менее 1 м. К массивным бетонным сооружениям можно отнести бетонные плотины, шлюзы, опоры мостов и эстакад, фундаменты под крупные сооружения и тяжелое оборудование, массивные колонны, подпорные стены и т.д.^{1,2} [1].

В первые сутки после укладки бетона температура внутри бетонного массива значительно повышается из-за процесса гидратации цемента. При увеличении температуры бетонный блок имеет тенденцию расширяться, что вызывает появление сжимающих напряжений. Поскольку модуль упругости в начальный период твердения бетона относительно мал, а ползучесть велика, сжимающие напряжения из-за роста температуры незначительны по величине. После достижения максимального разогрева следует процесс постепенного охлаждения массива. Понижение температуры бетонного блока вызывает тенденцию его уменьшения в объеме. К этому моменту бетон до-

стигает большого модуля упругости и имеет малую ползучесть. Деформации конструкции ограничены, и это приводит к появлению в бетонном массиве растягивающих напряжений. Превышение этих напряжений величины прочности материала на растяжение ведет к появлению температурных трещин [2, 3]. Чем выше температура разогрева бетона вследствие гидратации цемента, тем выше вероятность температурного трещинообразования. Как показали исследования [4], нагрев бетона может повлиять на долговечность бетонных конструкций в том случае, если максимальная температура разогрева массива превышает ~68–74 °С или разница температур между центром и внешней поверхностью массивных бетонных конструкций превышает 20–25 °С. Это вызывает необходимость принятия мер по ограничению теплоты гидратации в массивном бетоне [5–7].

Процесс гидратации цемента проходит 5 этапов: стадию растворения, гелеобразования и развития структуры, развития начальной прочности, фазу продолжающейся реакции и повышенной интенсивности, фазу долгосрочной стабилизации и зрелости. С целью изменения некоторых процессов и свойств бетонной смеси перед замешиванием или в ее процессе в определенной дозировке (не более 5 % от массы цемента) вводятся химические добавки³. Обычные добавки для бетона включают суперпластификаторы, замедлители схватывания, быстротвердеющие агенты. Вместе с достижением желаемых свойств бетона они влияют на термодинамический процесс бетона на стадиях термогидратации по разным механизмам [8].

¹ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

² ACI 207.1R-05 Guide to Mass Concrete.

³ TCVN 8826:2011. Chemical additives for concrete, 23 p. [Технический национальный стандарт Вьетнама TCVN 8826–2011. Химические добавки для бетона. Вьетнам, Ханой. С. 23].

Ингибитор понижения тепла гидратации цемента (ИПТ), являющийся относительно новым типом добавки к бетону, может замедлить скорость выделения тепла в результате реакции гидратации цемента, не влияя на общее количество тепла⁴. В последние годы он применялся в некоторых строительных проектах [9, 10].

Использованные ИПТ были получены путем кислотного гидролиза кукурузной или рисовой муки и содержали в основном гидроксильные кислотные соли и минералы [9–13]. Исследования показали, что добавление ИПТ в бетон снижает риск температурного трещинообразования за счет уменьшения скорости выделения тепла цементом на стадии ускоренного гидратационного процесса [14–17].

Принцип действия добавки ИПТ заключается в том, что она постепенно растворяется в щелочном растворе, образуя в процессе гидратации цемента, адсорбируется на поверхности цементных частиц и их гидратационных продуктов. Процесс растворения происходит достаточно медленно, что помогает замедлить скорость выделения тепла гидратации цементных частиц. Это в конечном счете помогает достичь цели по снижению максимальной температуры в конструкции монолитного бетона.

Добавка ИПТ замедляет схватывание бетона и отличается от замедляющих добавок. Добавки, замедляющие схватывание, главным образом удлиняют время процесса на стадии формирования геля и развития структуры в ходе гидратации цемента. Тем самым замедляется тепловыделение и отодвигается во времени момент возникновения максимальной температуры разогрева бетонного массива. Однако на следующем этапе формирования структуры бетона процесс гидратации продолжается быстрее и максимальная температура может повыситься по сравнению с вариантом бетона без использования замедляющей добавки. Поэтому обычные замедлители схватывания не решают большинство проблем, связанных с образованием температурных трещин.

Количество ингибитора понижения температуры, добавляемое при изготовлении бетона, влияет на степень снижения и скорость набора максимальной температуры бетонной конструкции. С увеличением содержания добавки ИПТ эти параметры уменьшаются. В то же время в процессе гидратации при использовании ИПТ образующийся C-S-H (гидратированный силикат кальция — $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) остается очень стабильным и не поддается влиянию добавки. Поэтому конечная прочность бетона изменяется незначительно³. Как и для других химических добавок, количество добавки ИПТ зависит от конкретного продукта и рекомендуется производителем⁴.

⁴ JC/T 2608-2021. Concrete hydration temperature rise inhibitor [Технический стандарт Китая JC/T 2608–2021. Ингибитор повышения температуры гидратации цемента. КНР, Пекин].

Многие исследования подтвердили эффективность добавки ИПТ при ее добавлении в бетонную смесь. Так, в работе [9] изучалось воздействие ингибитора понижения тепла на основе крахмала на процесс гидратации цемента при его различных дозах: 0,2; 0,4; 0,6 % от веса цемента.

Результаты показали снижение максимальной температуры разогрева с 35,9 (вариант без добавки ингибитора) до 34,7 °C при 0,2 % добавки, 31,8 °C при 0,4 % добавки и 24,9 °C при 0,6 % добавки. Кроме того, увеличение содержания добавки ИПТ привело к уменьшению скорости повышения температуры на стадии ускорения гидратации и скорости охлаждения конструкции после набора максимальной температуры, что является важным фактором для контроля температурных трещин [9].

В работе [14] добавка ИПТ использовалась в экспериментах с концентрациями 0; 0,2; 0,4 и 0,6 % от веса цемента для конструкций толщиной 1,2 м. Результаты экспериментов показали, что при содержании добавки ИПТ 0,6 % от веса цемента максимальная температура снижалась примерно на 11,0 %, а максимальное растягивающее напряжение — на 11,7 %, что эффективно предотвращало появление температурных трещин [14].

В аналогичных исследованиях [17] рассматривался процесс гидратации и изменение механических свойств бетонной смеси с различным содержанием добавки ИПТ в интервале от 0 до 1,0 %. Максимальная скорость повышения температуры смеси с использованием 1 % ИПТ была на 36,3 % ниже, чем у смеси без добавки. Добавка ИПТ ингибирует процесс гидратации цементного раствора в основном в течение 7 дней, что приводит к снижению начальной прочности смеси на 43,4 %. Однако с течением времени разница в прочности уменьшается и ИПТ способствует увеличению прочности на поздних стадиях после 28 дней.

Результаты аналогичных исследований по изучению воздействия добавки ИПТ с различным содержанием на повышение температуры, прочность и свойства бетонной смеси с использованием полевых экспериментов изложены в труде [10]. В результате экспериментов определено оптимальное содержание добавки ИПТ. Экспериментальные исследования проводились для контроля трещин на стенах туннелей, заливаемых бетоном на месте. В ходе исследования установлено, что оптимальное содержание добавки ИПТ составляет 1 % от массы цемента. При добавлении 1 % добавки ИПТ в бетонную смесь для стен туннеля максимальное повышение температуры снизилось, а время достижения пиковой температуры было замедлено. В итоге на стенах туннеля трещины не зафиксированы.

В данной работе авторы используют результаты ранее проведенных экспериментов по тепловыделению состава бетона с добавкой ингибитора понижения температуры гидратации цемента [18]. С применением численного метода конечных элементов (МКЭ) получены результаты решения температурной

задачи и задачи по определению термонапряженного состояния для условий Вьетнама. Численные исследования выполнены на основе МКЭ с использованием программного комплекса (ПК) Midas Civil 2019.

Осуществлено сравнение результатов для двух вариантов бетона: без добавления и с добавлением ИПТ. Сделана оценка вероятности возникновения температурных трещин в ранний период твердения бетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Изучалось влияние добавки ИПТ на максимальную температуру и риск образования трещин в возводимом бетонном фундаменте размерами 6 × 12 × 3,6 м. Расчетная схема бетонного блока и частью прилегающего основания представлена на рис. 1. С использованием симметрии бетонного блока с основанием рассматривалась 1/4 модели для уменьшения объемов вычислений (рис. 1).

Для оценки воздействия добавки ИПТ на температурный режим и термонапряженное состояние массивного бетонного фундамента рассматривалось 2 варианта бетонной смеси: без использования ИПТ (вариант 1) и с добавкой 1 % ИПТ от веса вяжущего (цемент + зола) (вариант 2) в соответствии с рекомендациями производителя. Состав бетонной смеси, свойства материалов, тип добавки ИПТ и результаты измерения температуры в адиабатическом эксперименте двух бетонных смесей взяты по исследовани-

ям [18] и представлены в табл. 1–3. Предполагаемые температурные режимы строительства и свойства материалов представлены в табл. 2.

Основы метода конечных элементов в решении температурных задач

Решение температурной задачи основано на решении основного дифференциального уравнения теплопроводности, которое имеет вид [19, 20]:

∂/∂x(kx ∂T/∂x) + ∂/∂y(ky ∂T/∂y) + ∂/∂z(kz ∂T/∂z) + qv = ρCp ∂T/∂t, (1)

где T = f(x, y, z, t) — искомая температурная функция; kx, ky, kz — коэффициенты теплопроводности материала в трех направлениях x, y, z соответственно, Вт/м·°C; qv — тепловыделение в единице объема или скорость тепловыделения, Вт/м³; ρ — плотность бетона, кг/м³; Cp — удельная теплоемкость, Дж/кг·°C; t — время, ч.

Для решения уравнения (1) используются два основных граничных условия (1-го и 2-го рода), заданных уравнениями (2) и (3):

Tm = Ta на поверхности S1; (2)

kx ∂T/∂x l + ky ∂T/∂y m + kz ∂T/∂z n + q + h(T - Ta) = 0 (3) на поверхности S2,

где Tm — температура на поверхности бетона или грунта, °C; Ta — температура окружающей среды; l, m, n — направляющие косинусы поверхностей теплопереда-

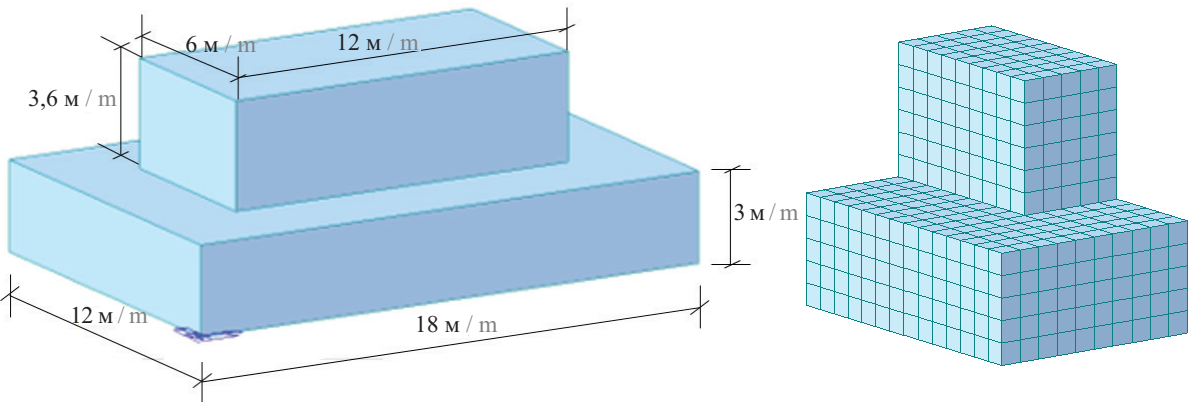


Рис. 1. Расчетная схема и разбиение сетки конечных элементов на 1/4 модели конструкции

Fig. 1. Calculation scheme and division of the finite element mesh into 1/4 of the design model

Табл. 1. Состав вариантов бетонной смеси

Table 1. Composition of concrete mix options

Бетонная смесь Concrete mix	Цемент, кг/м³ Cement, kg/m³	Зола уноса, кг/м³ Fly ash, kg/m³	Песок, кг/м³ Sand, kg/m³	Щебень, кг/м³ Crushed stone, kg/m³	Вода, кг/м³ Water, kg/m³	ИПТ, кг/м³ TRI, kg/m³
Бетонная смесь 1 Concrete mix 1	246	82	609	1333	118	0
Бетонная смесь 2 Concrete mix 2	246	82	609	1333	118	3,28

Табл. 2. Механические и физические свойства материалов
Table 2. Mechanical and physical properties of materials

Параметры материала, ед. / Material parameters, units	Значение / Meaning		
	Бетонная смесь 1 Concrete mix 1	Бетонная смесь 2 Concrete mix 2	Основание Foundation
Коэффициент теплопроводности, кДж/(м·ч·°C) Thermal conductivity coefficient, kJ/(m·h·°C)	7,74	7,74	7,2
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°C) Specific heat capacity, kJ/(kg·°C)	0,97	0,97	0,84
Плотность, кг/м³ / Density, kg/m³	2390	2390	1800
Коэффициент конвективной теплопередачи, кДж/(м²·ч·°C) Convective heat transfer coefficient, kJ/(m²·h·°C)	16,6	16,6	40
Модуль упругости, Н/м² / Modulus of elasticity, N/m²	3,2 · 10 ¹⁰	3,25 · 10 ¹⁰	1,8 · 10 ¹⁰
Прочность на сжатие $f'c$, МПа Compressive strength $f'c$, MPa	33,3	35,4	
Коэффициент температурного расширения α Coefficient of thermal expansion α	10 · 10 ⁻⁶	10 · 10 ⁻⁶	10 · 10 ⁻⁶
Коэффициент Пуассона / Poisson's ratio	0,167	0,167	0,20
Начальная температура, °C / Initial temperature, °C	25	25	25

Табл. 3. Результаты измерения температуры двух образцов бетонной смеси в адиабатическом эксперименте (приращение температуры вследствие гидратации цемента)
Table 3. Results of temperature measurements of two concrete mix specimens in an adiabatic experiment (temperature increase due to cement hydration)

Время (день) / Time (day)	1	2	3	4	5	6	7	14	21	28
Бетонная смесь 1, °C Concrete mix 1, °C	17,5	23,5	26,4	28,5	30,3	30,9	31,6	33,4	34,2	35,0
Бетонная смесь 2, °C Concrete mix 2, °C	6,1	9,6	13,2	16,5	18,9	20,3	21,8	32,4	33,0	34,5

чи; q — тепловой поток на границе; h — коэффициент конвективного тепловыделения, ккал/м²·ч·°C.

Граничное условие 1-го типа (2) используется по нижней горизонтальной поверхности расчетной области, где задается температура основания. Граничное условие 2-го типа (3) применяется по поверхностям контакта основания или блока с воздухом.

Метод конечных элементов при решении задачи нестационарного теплообмена и внутренних источников выражается сокращенным матричным уравнением следующего вида:

$$[C]\left\{\frac{\partial T}{\partial \tau}\right\} + [K]\{T\} = \{f\}. \tag{4}$$

При нестационарной задаче теплопередачи необходимо разложить время по временным шагам $\Delta\tau$, на каждом из которых производная температуры по времени определяется так:

$$\left\{\frac{\partial T}{\partial \tau}\right\} = \frac{1}{\Delta\tau}\{[T(\tau_n) - T(\tau_{n-1})]\}. \tag{5}$$

Уравнение (4) можно переписать следующим образом:

$$\frac{[C]}{\Delta\tau}\{[T(\tau_n) - T(\tau_{n-1})]\} + [K]\{T\} = \{f\}, \tag{6}$$

где $[C]$ — матрица удельной теплоемкости; $\Delta\tau = \Delta\tau_n - \Delta\tau_{n-1}$ — шаг расчета по времени; $[K]$ — матрица коэффициентов теплопроводности; $\{f\}$ — генерируемая тепловая матрица.

Решение уравнения (6) дает нам температурное поле в бетонном блоке в разные моменты времени.

Оценка риска термического растрескивания на ранних стадиях в массивных бетонных конструкциях по индексу трещин и вероятности появления трещин

Оценка и прогнозирование образования трещин в массивных бетонных конструкциях играет очень важную роль при проектировании и строительстве. Это помогает инженерам активно использовать необходимые меры для минимизации риска образования трещин и контроля развития трещин в конструкциях. Существует множество критериев оценки и прогнозирования образования термических трещин на раннем этапе, введенных во многих странах. Каждый критерий имеет свои преимущества и недостатки, подходящие для конкретных условий и конструкций. Однако общее правило, обеспечивающее отсутствие термических трещин в конструкции, заключается в том, что возникающее в бетонной конструкции

температурное напряжение не должно превышать предел прочности бетона:

$$\sigma_n(t) \leq f_k(t), \tag{7}$$

где $\sigma_n(t)$ — температурное напряжение в момент времени t , МПа; $f_k(t)$ — предел прочности бетона в момент времени t , МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты температурного анализа массивного бетонного фундамента для двух вариантов бетонной смеси с использованием Midas Civil 2019 представлены на рис. 2, 3. Сравнение полученных результатов позволяет отметить следующее. На начальном этапе твердения бетона (первые 6 суток после укладки) кривая повышения температуры для варианта 1 значительно круче, чем для варианта 2 (рис. 3).

Это свидетельство того, что скорость выделения тепла у варианта 1 гораздо выше, чем у варианта 2. Максимальная температура в фундаменте из бетона без добавки ИПТ (вариант 1) достигается через 140 ч после укладки и равна 57,87 °С. Для варианта бетона с добавкой ИПТ (вариант 2) максимальная температура, равная 53,23 °С, возникает через 360 ч (рис. 2, 3). Таким образом, максимальная разница температур в центре массива и на его поверхности (при температуре воздуха, принятой 25 °С) равна 31,8 °С для варианта 1 и 26,3 °С для варианта 2, что превосходит рекомендуемые ограничения1. После достижения пиковой температуры оба бетонных массива начинают остывать. Остывание конструкции для обоих вариантов происходит с примерно одинаковой скоростью, так как две части кривых после 360 ч после укладки бетона почти параллельны (рис. 3).

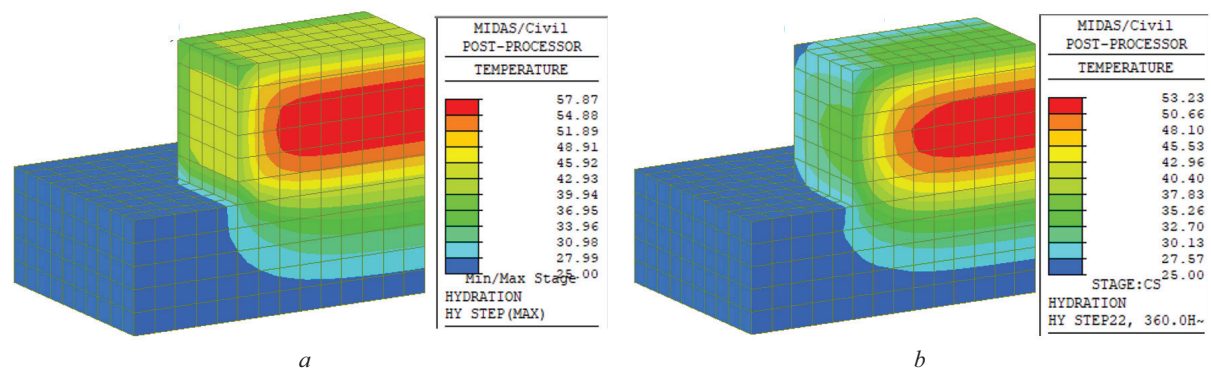


Рис. 2. Поле температуры на моменты времени возникновения максимальной температуры в центре бетонного массива: а — для варианта бетона 1 (без добавки ИПТ); б — для варианта бетона 2 (с добавкой 1 % ИПТ)

Fig. 2. Temperature field at the moments of time of occurrence of the maximum temperature in the cente of the concrete mass: а — for concrete variant 1 (without the addition of TRI); б — for concrete variant 2 (with the addition of 1 % TRI)

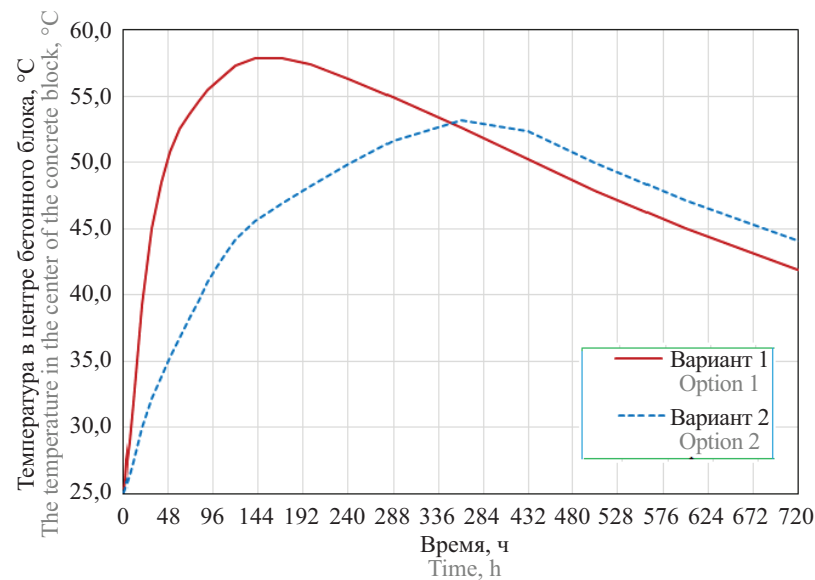


Рис. 3. Изменение температуры в центре массивного бетонного фундамента с течением времени для двух вариантов бетонной смеси

Fig. 3. Temperature change at the cente of a massive concrete foundation over time for two concrete mix options

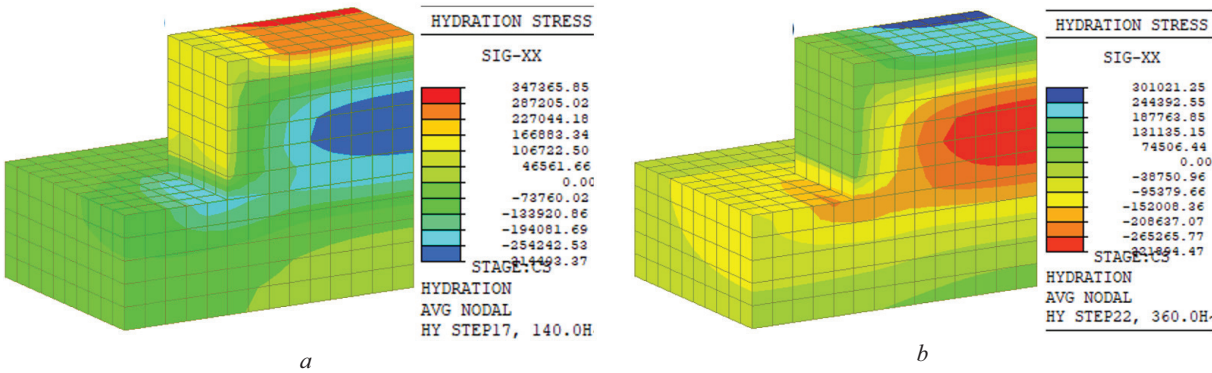


Рис. 4. Распределение термических напряжений в массивном бетонном фундаменте на моменты времени возникновения максимальных растягивающих напряжений: *a* — для варианта бетона 1 (без добавки ИПТ); *b* — для варианта бетона 2 (с добавкой 1 % ИПТ)

Fig. 4. Distribution of thermal stresses in a massive concrete foundation at the moments of time of occurrence of maximum tensile stresses: *a* — for concrete variant 1 (without TRI additive); *b* — for concrete variant 2 (with 1 % TRI additive)

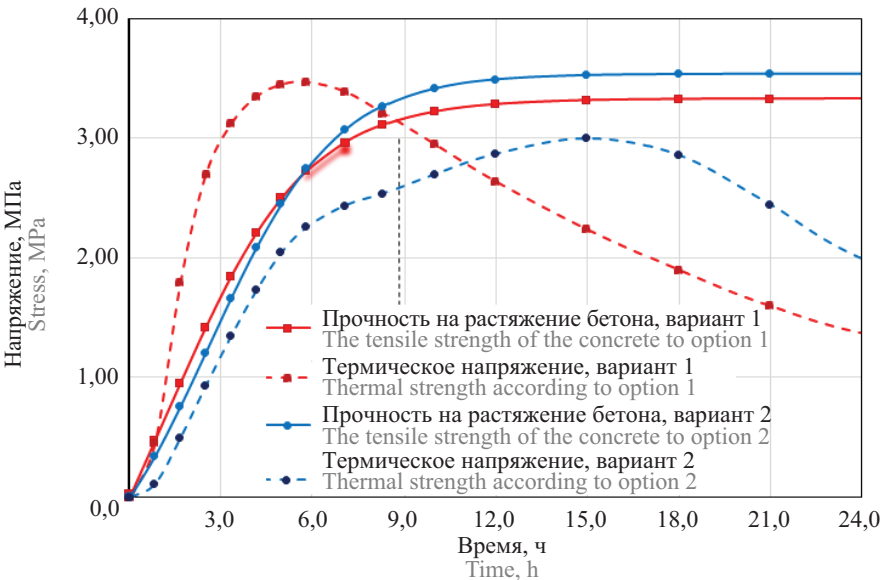


Рис. 5. Графики изменения термических напряжений и прочности бетона на растяжение по времени

Fig. 5. Graphs of changes in thermal stresses and tensile strength of concrete over time

На каждом шаге по времени также решалась задача по определению термонапряженного состояния бетонного массива и прилегающего основания. Некоторые результаты решения представлены на рис. 4, 5.

На рис. 4 приведены поля температурных напряжений на моменты времени, когда возникают максимальные растягивающие напряжения: 140 ч после укладки бетона для варианта 1 (рис. 4, *a*) и 360 ч — для варианта 2. Максимальные растягивающие напряжения возникают на поверхности массива и равны соответственно 3,47 МПа (вариант 1) и 3,00 МПа (вариант 2).

По результатам расчета по ПК Midas Civil 19 для двух вариантов бетонной смеси также были построены графики изменения во времени термических напряжений и пределов прочности бетона (рис. 5).

Как видно, максимальное растягивающее термическое напряжение, возникающее в варианте 1, составляет 3,47 МПа через 5 дней, а в варианте 2 — 3,0 МПа через 15 дней. Это полностью соответствует времени достижения бетоном максимальной температуры для рассмотренных вариантов.

Можно отметить, что для варианта бетона с добавкой ИПТ возникающее в конструкции максимальное термическое напряжение всегда меньше, чем предел прочности бетона на этот момент времени (рис. 5). Это свидетельствует о минимальном риске термического растрескивания. Что касается конструкций с использованием бетонной смеси без добавки ИПТ (вариант 1), то в период времени от 1 до почти 9 дней после укладки бетона возникающие растягивающие термические

напряжения превышают предел прочности бетона, т.е. не выполняется условие (7). Поэтому риск появления термических трещин в этот период очень велик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Рассмотренный вид ингибитора понижения теплоты гидратации достаточно эффективен для уменьшения тепловыделения от гидратации цемента в массивных бетонных конструкциях. Его использование снижает скорость тепловыделения на ранней стадии твердения бетона (первые 6 суток после укладки), что задерживает время достижения пиковой температуры. При этом также снижается максимальная температура в конструкции.

После достижения максимальной температуры скорость снижения теплоты в бетоне без применения добавок ИПТ и с применением добавок ИПТ одина-

кова, это доказывает, что добавки ИПТ не вызывают термического удара конструкции.

При использовании 1 % содержания рассмотренной добавки ИПТ (от расхода вяжущего цемент + зола) при строительстве массивных бетонных фундаментов с размерами, на превышающими размеры рассмотренного варианта, фундамент не подвергается риску появления термических трещин. Возникающие в конструкции максимальные термические напряжения в этом случае всегда меньше, чем предел прочности бетона на всем временном интервале.

Результаты представленного исследования являются первым шагом в решении исследуемой проблемы и требуют дальнейшего развития. В последующем планируется результаты исследования сравнить с результатами натурных экспериментов, чтобы полностью оценить влияние добавки ИПТ на процесс тепловыделения при гидратации цемента и возможного температурного трещинообразования в массивных бетонных конструкциях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kuzmanovic V., Savic L., Mladenovic N. Computation of Thermal-Stresses and Contraction Joint Distance of RCC Dams // *Journal of Thermal Stresses*. 2013. Vol. 36. Issue 2. Pp. 112–134. DOI: 10.1080/01495739.2013.764795
2. Atrushi D.S. Tensile and compressive creep of young concrete: Testing and modelling : Doctoral Thesis. 2003. 333 p.
3. Bofang Z. Thermal stresses and temperature control of mass concrete. Butterworth-Heinemann, 2014. DOI: 10.1016/C2012-0-06038-3
4. Gajda J., Vangeem M. Controlling temperatures in mass concrete // *ACI Concrete International*. 2002. Vol. 24. Issue 1. Pp. 59–62.
5. Орехов В.Г., Анискин Н.А., Малаханов В.В., Бестужева А.С., Саинов М.П., Солдатов П.В. и др. Гидротехнические сооружения. Часть 2. М. : АСВ, 2011. 535 с. EDN QNPLYZ.
6. Zhang X., Shi R., Dai H., Liu Q., Zhang X. Simulation and research on temperature field of taishan roller compacted concrete gravity dam // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 237. P. 032117. DOI: 10.1088/1755-1315/237/3/032117
7. Nguyen T.C., Bui A.K. Evaluation of the impact of parameter inputs of concrete mix on the distribution of temperature in the mass concrete structure // *Structural Integrity and Life*. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 8–12. EDN KPTOUC.
8. Kong F.R., Pan L.S., Wang C.M., Zhang D.L., Xu N. Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 105. Pp. 545–553. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.178
9. Zhang H., Wang W., Li Q., Tian Q., Li L., Liu J. A starch-based admixture for reduction of hydration heat in cement composites // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 173. Pp. 317–322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.199
10. Wang X., Shi M., Wang X. Application of hydration heat inhibitor in crack control of mass concrete of tunnel side wall // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 283. P. 01032. DOI: 10.1051/e3sconf/202128301032
11. Liang T., Luo P., Mao Z., Huang X., Deng M., Tang M. Effect of Hydration Temperature Rise Inhibitor on the Temperature Rise of Concrete and Its Mechanism // *Materials*. 2023. Vol. 16. Issue 8. P. 2992. DOI: 10.3390/ma16082992
12. Malaiškieienė J., Vaičienė M. The Influence of Silica Fly Ash and Wood Bottom Ash on Cement Hydration and Durability of Concrete // *Materials*. 2024. Vol. 17. Issue 16. P. 4031. DOI: 10.3390/ma17164031
13. Yan Y., Ouzia A., Yu C., Liu J.P., Scrivener K.L. Effect of a novel starch-based temperature rise inhibitor on cement hydration and microstructure development // *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 129. P. 105961. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105961
14. Zhang H., Liu X., Feng P., Li L., Wang W. Influence of temperature rising inhibitor on nucleation and growth process during cement hydration // *Thermochimica Acta*. 2019. Vol. 681. P. 178403. DOI: 10.1016/j.tca.2019.178403
15. Wang X., Shi M., Wang X. Application of hydration heat inhibitor in crack control of mass concrete of tunnel side wall // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 283. P. 01032. DOI: 10.1051/e3sconf/202128301032
16. Zhang H., Li L., Feng P., Wang W., Tian Q., Liu J. Impact of temperature rising inhibitor on hydration

kinetics of cement paste and its mechanism // *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 93. Pp. 289–300. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.07.018

17. Shao X., Ning J., Tang R., Fang Z., Zhao B., Xu B. et al. Effect of temperature-rising inhibitor on the hydration and performance of cemented paste-filling material // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 19. P. e02680. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02680

18. Xu W., Qiang S., Hu Z., Ding B., Yang B. Effect of hydration heat inhibitor on thermal stress of hydraulic structures with different thicknesses // *Advances*

in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Issue 1. DOI: 10.1155/2020/5029865

19. Aniskin N.A., Shaytanov A.M. Optimization of the Temperature and Thermo-Stressed State of a Concrete Dam Constructed from Particularly Lean Roller-Compacted Concrete // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 4. P. 914. DOI: 10.3390/buildings13040914

20. Jia C., Shao A., Li Y., Ren Q. Analyses of thermal stress field of high concrete dams during the process of construction // *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2010. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5449456

Поступила в редакцию 20 января 2025 г.

Принята в доработанном виде 30 января 2025 г.

Одобрена для публикации 31 января 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Нгуен Чонг Чык — кандидат технических наук, главный преподаватель; **Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона**; г. Ханой, Вьетнам; Scopus: 57214830825, ORCID: 0000-0001-9723-5161; trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn;

Хоанг Куок Лонг — кандидат технических наук, доцент; **Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона**; г. Ханой, Вьетнам; ORCID: 000-0002-9656-0664; hoanglongcse@gmail.com;

Ле Ван Хунг — аспирант; **Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона**; г. Ханой, Вьетнам; ResearcherID: MDT-6226-2025, ORCID: 0009-0003-7382-9573; levanhungsqcb@gmail.com;

Николай Алексеевич Анискин — доктор технических наук, профессор, директор Института гидротехнического и энергетического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 260568, Scopus: 6506856726, ResearcherID: B-6884-2016, ORCID: 0000-0002-4423-754X; nikolai_aniskin@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kuzmanovic V., Savic L., Mladenovic N. Computation of Thermal-Stresses and Contraction Joint Distance of RCC Dams. *Journal of Thermal Stresses*. 2013; 36(2):112-134. DOI: 10.1080/01495739.2013.764795

2. Atrushi D.S. *Tensile and compressive creep of young concrete: Testing and modelling: Doctoral Thesis*. 2003; 333.

3. Bofang Z. *Thermal stresses and temperature control of mass concrete*. Butterworth-Heinemann, 2014. DOI: 10.1016/C2012-0-06038-3

4. Gajda J., Vangeem M. Controlling temperatures in mass concrete. *ACI Concrete International*. 2002; 24(1):59-62.

5. Aniskin N.A., Malakhanov V.V., Bestuzheva A.S., Sainov M.P., Soldatov P.V. et al. *Water-development works. Part 2*. Moscow, ASV, 2011; 535. EDN QNPLYZ. (rus.).

6. Zhang X., Shi R., Dai H., Liu Q., Zhang X. Simulation and research on temperature field of taishan roller compacted concrete gravity dam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 237:032117. DOI: 10.1088/1755-1315/237/3/032117

7. Nguyen T.C., Bui A.K. Evaluation of the impact of parameter inputs of concrete mix on the distribution of temperature in the mass concrete structure. *Structural Integrity and Life*. 2019; 19(1):8-12. EDN KPTOUC.

8. Kong F.R., Pan L.S., Wang C.M., Zhang D.L., Xu N. Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste. *Construction and Building Materials*. 2016; 105:545-553. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.178

9. Zhang H., Wang W., Li Q., Tian Q., Li L., Liu J. A starch-based admixture for reduction of hydration heat in cement composites. *Construction and Building Materials*. 2018; 173:317-322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.199

10. Wang X., Shi M., Wang X. Application of hydration heat inhibitor in crack control of mass concrete of tunnel side wall. *E3S Web of Conferences*. 2021; 283:01032. DOI: 10.1051/e3sconf/202128301032

11. Liang T., Luo P., Mao Z., Huang X., Deng M., Tang M. Effect of Hydration Temperature Rise Inhibitor on the Temperature Rise of Concrete and Its Mechanism. *Materials*. 2023; 16(8):2992. DOI: 10.3390/ma16082992

12. Malaiškienė J., Vaičienė M. The Influence of Silica Fly Ash and Wood Bottom Ash on Cement Hydration and Durability of Concrete. *Materials*. 2024; 17(16):4031. DOI: 10.3390/ma17164031

13. Yan Y., Ouzia A., Yu C., Liu J.P., Scrivener K.L. Effect of a novel starch-based temperature rise inhibitor on cement hydration and microstructure development. *Cement and Concrete Research*. 2020; 129:105961. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105961

14. Zhang H., Liu X., Feng P., Li L., Wang W. Influence of temperature rising inhibitor on nucleation and growth process during cement hydration. *Thermochimica Acta*. 2019; 681:178403. DOI: 10.1016/j.tca.2019.178403

15. Wang X., Shi M., Wang X. Application of hydration heat inhibitor in crack control of mass concrete of tunnel side wall. *E3S Web of Conferences*. 2021; 283:01032. DOI: 10.1051/e3sconf/202128301032

16. Zhang H., Li L., Feng P., Wang W., Tian Q., Liu J. Impact of temperature rising inhibitor on hydration kinetics of cement paste and its mechanism. *Cement and*

Concrete Composites. 2018; 93:289-300. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.07.018

17. Shao X., Ning J., Tang R., Fang Z., Zhao B., Xu B. et al. Effect of temperature-rising inhibitor on the hydration and performance of cemented paste-filling material. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19:e02680. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02680

18. Xu W., Qiang S., Hu Z., Ding B., Yang B. Effect of hydration heat inhibitor on thermal stress of hydraulic structures with different thicknesses. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020(1). DOI: 10.1155/2020/5029865

19. Aniskin N.A., Shaytanov A.M. Optimization of the Temperature and Thermo-Stressed State of a Concrete Dam Constructed from Particularly Lean Roller-Compacted Concrete. *Buildings*. 2023; 13(4):914. DOI: 10.3390/buildings13040914

20. Jia C., Shao A., Li Y., Ren Q. Analyses of thermal stress field of high concrete dams during the process of construction. *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2010; 1-5. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5449456

Received January 20, 2025.

Adopted in revised form on January 30, 2025.

Approved for publication on January 31, 2025.

B I O N O T E S: **Nguyen Trong Chuc** — Candidate of Technical Sciences, Chief Lecturer; **Le Quy Don Technical University**; Hanoi, Vietnam; Scopus: 57214830825, ORCID: 0000-0001-9723-5161; trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn;

Hoang Quoc Long — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Le Quy Don Technical University**; Hanoi, Vietnam; ORCID: 000-0002-9656-0664; hoanglongese@gmail.com;

Le Van Hung — postgraduate student; **Le Quy Don Technical University**; Hanoi, Vietnam; ResearcherID: MDT-6226-2025, ORCID: 0009-0003-7382-9573; levanhungsqcb@gmail.com;

Nikolay A. Aniskin — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Hydrotechnical and Power Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 260568, Scopus: 6506856726, ResearcherID: B-6884-2016, ORCID: 0000-0002-4423-754X; nikolai_aniskin@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.