УДК 666.97

© Танг Ван Лам, аспирант

© Нгуен Чонг Чык, аспирант

© Б. И. Булгаков, канд. техн. наук, доцент

© О. В. Александрова, канд. техн. наук, доцент

© О. А. Ларсен, канд. техн. наук, доцент

(Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет)

E-mail: lamvantang@gmail.com, ntchuc.mta198@gmail.com,
fakultetst@mail.ru, aleks_olvl@mail.ru, larsen.oksana@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-6-45-54

© Tang Van Lam, post-graduate student

© Nguyen Trong Chuc, post-graduate student

© B. I. Bulgakov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© O. V. Aleksandrova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© O. A. Larsen, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Moscow State (National Research)
University of Civil Engineering)

E-mail: lamvantang@gmail.com, ntchuc.mta198@gmail.com,
fakultetst@mail.ru, aleks_olvl@mail.ru, larsen.oksana@mail.ru

РАСЧЕТ СОСТАВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН В ВОЗВОДИМОЙ МОСТОВОЙ ОПОРЕ

CALCULATION OF HEAVY CONCRETE COMPOSITION AND ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF CRACKING IN THE BRIDGE SUPPORT CONSTRUCTION

Для определения состава тяжелого бетона, предназначенного для строительства мостовых опор V-образной формы, был использован вьетнамский стандарт TCVN 9382–2012. Оценка возможности трещинообразования в монолитном бетоне мостовой опоры в ходе ее возведения была выполнена путем анализа ее температурного поведения и возникающего растягивающего напряжения. В результате проведенных исследований была доказана возможность получения тяжелого бетона с требуемыми свойствами из местных сырьевых материалов Вьетнама. С помощью компьютерной программы Midas Civil были определены максимальные температуры в центральной зоне монолитной бетонной конструкции на всех трех этапах сооружения мостовой опоры.

Ключевые слова: прочность на сжатие, прочность на растяжение при изгибе, трещинообразование, мостовая опора V-образной формы, растягивающее напряжение, максимальная температура, температурное поведение, термонапряженное состояние.

In order to determine the composition of heavy concrete intended for the construction of V-shaped bridge supports, there was used the TCVN 9382-2012 Vietnamese standard. The assessment of the possibility of cracking in monolithic concrete of the bridge support during its construction was performed by analyzing its temperature behavior and the resulting tensile stress. As a result of the study, it has been proved that it is possible to obtain heavy concrete with the required properties from local raw materials of Vietnam. With the help of the Midas Civil computer program, the maximum temperatures in the central zone of monolithic concrete construction were determined for all three phases of the construction of bridge support.

Keywords: compressive strength, tensile strength, cracking, V-shaped bridge support, tensile stress, maximum temperature, temperature behavior, thermal-stress state.

Введение

Проблема с перегруженностью дорожной сети в крупных городах очень актуальна для многих развитых стран мира. К мостовым опорам автомобильных путепроводов и эстакад многоуровневых городских транспортных развязок предъявляются особые требования, вызванные стесненными условиями городской застройки и повышенными требованиями к безопасности движения транспорта и пешеходов [1–3]. Поэтому

му вопросы строительства путепроводов и эстакад, а также большепролетных автомобильных мостов в густонаселенных городах Вьетнама весьма актуальны и имеют для страны важное экономическое и социальное значение.

Массивные мостовые опоры, у которых отношение толщины к ширине или их высоте более 1/8, характерны для современных городских эстакад и транспортных развязок (рис. 1) [4–6].

Однако в массивных конструкциях многих сооружений, в том числе и мостовых опор, в процессе твердения бетона его растворная составляющая может дать усадку, при этом в зоне ее контакта с более жестким заполнителем возникают усадочные трещины¹ [7]. Кроме того, из-за больших размеров твердеющих конструкций тепло, выделяющееся при гидратации цемента в раннем возрасте, сложно перераспределить из их внутренних слоев наружу для создания равномерного температурного поля в теле конструкции, в результате чего возникает большой перепад температур между их центральными зонами и наружными слоями [8–11]. Поэтому значительное тепловыделение при гидратации вяжущего вещества при твердении бетона массивных конструкций может привести к возникновению чрезмерных растягивающих напряжений из-за появления экстремальных температурных градиентов, результатом которых зачастую становятся трещины в теле конструкций, что снижает их прочность, надежность, а следовательно, работоспособность и долговечность сооружений [12–15].

В связи с этим определение температурного поля и термонапряженного состояния чрезвычайно важно для оценки вероятности возникно-

¹ Vietnam Electricity Corporation. Report of cracks occurring at RCC dam in Son La hydropower plant. Hanoi, 2009. 86 p.

Рис. 1. Мостовая опора V-образной формы на участке шоссе во Вьетнаме

вения трещин в раннем возрасте твердения бетона [16–18]. Анализ температурного поведения для подобных массивных бетонных конструкций является достаточно сложным ввиду их пространственной формы, а также влияния многих внутренних и внешних факторов. В последние годы для решения температурной задачи с целью более полного учета влияния различных факторов широкое распространение получили численные методы, в частности метод конечных элементов, и различные компьютерные программы типа Adina, Abaqus, Midas Civil², Ansys и др. [19].

В данной работе с помощью вьетнамского стандарта TCVN 9382–2012 был рассчитан состав тяжелого бетона, предназначенного для сооружения опор автомобильных мостов, затем были экспериментально определены свойства бетонной смеси и бетона на ее основе и с помощью компьютерной программы Midas Civil рассчитаны максимальная температура, температурный режим и термонапряженное состояние в бетонной мостовой опоре V-образной формы.

1. Материалы и методы

В качестве сырьевых материалов были использованы:

- портландцемент (Ц) ЦЕМ I 42,5 Н производства завода «Хоанг Тхач» (Вьетнам) с истинной плотностью $3,12 \text{ г/см}^3$ и максимальным тепловыделением в период гидратации 309 кДж/кг . Стоимость 1 кг портландцемента составила 3,78 руб. в пересчете на рубли по курсу января 2018 г.;
- кварцевый песок (П) реки Ло (Вьетнам) с модулем крупности $M_k = 3,0$, истинной плотностью $2,67 \text{ г/см}^3$ и средней насыпной плотностью в уплотненном состоянии 1650 кг/м^3 ;
- известняковый щебень (Щ) из карьера «Киен Кхе» (Вьетнам) смешанной фракции 5–20 мм с истинной плотностью $2,66 \text{ г/см}^3$ и средней насыпной плотностью в уплотненном состоянии 1600 кг/м^3 ;
- зола рисовой шелухи (ЗРШ) (Вьетнам) с истинной плотностью $2,32 \text{ г/см}^3$ и насыпной плотностью 572 кг/м^3 . Стоимость 1 кг ЗРШ составила 2,12 руб. в пересчете на рубли по указанному курсу;
- водопроводная вода (В) в качестве воды затворения для получения бетонной смеси.

² MIDAS Information Technology. Heat of Hydration – Analysis Manual. Version 2011, 256 p.

Примененные методы исследований

- Для расчета составов бетонных смесей использовали стандарт ТCVN 9382–2012 (СРВ);
- удобоукладываемость бетонной смеси оценивали по осадке конуса (ОК) в сантиметрах с помощью стандартного конуса с размерами 100×200×300 мм в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 10181–2014;
- прочность бетонов на сжатие и на растяжение при изгибе определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 10180–2012;
- средняя плотность бетона оценивали по ГОСТ 12730.1–78;
- для определения тепловыделения в период гидратации цемента использовали стандарт ASTM C186-17;
- с помощью компьютерной программы Midas Civil были рассчитаны максимальная температура, температурное поле и термонапряженное состояние в V-образной бетонной опоре моста с целью оценки возможности появления термических трещин в ее теле в ходе строительства.

Теоретические основы процесса переноса тепла и соотношение между напряжением и температурой в материалах и бетонах

По данным исследования [20] дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где k_x, k_y, k_z — коэффициенты температуропроводности материала, соответственно в направлении по осям координат x, y и z , $\text{м}^2/\text{с}$; q_v — количество тепла, выделяемое внутренними источниками к данному моменту времени, например, при гидратации цемента, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$; c — удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ — плотность бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$; τ — время твердения бетона, сут.

Для решения уравнения (1) нужно знать следующие четыре граничных условия:

- граничные условия 1-го рода: определяют температуру в любой момент времени;
- граничные условия 2-го рода: показатель величины теплового потока на контуре тела;
- граничные условия 3-го рода: определяют закон свободного теплообмена с окружающей средой:

$$k \frac{\partial t}{\partial n} = h(t_{\text{п}} - t_{\text{с}}), \quad (2)$$

где n — внешняя нормаль; h — коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{\text{п}}$ — температура поверхности, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{с}}$ — температура среды, $^\circ\text{C}$;

- граничные условия 4-го рода: учитывают существование плотного теплового контакта на границе двух тел:

$$t_{1k} = t_{2k}; k_1 \frac{\partial t_1}{\partial n} = k_2 \frac{\partial t_2}{\partial n}, \quad (3)$$

где t_{1k}, t_{2k} — температура соответственно первого и второго тела, $^\circ\text{C}$; k_1, k_2 — теплопроводность этих тел, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

По мнению ученых разных стран, сложившемуся в последние годы, наиболее полный учет факторов при решении температурной задачи возможен с применением численных методов на основе теории переноса тепла, в частности — метода конечных элементов с помощью компьютерных программ Midas Civil³, Ansys, Adina, Abaqus и др. [17, 20, 21].

Согласно результатам исследования [22] отношение между напряжением и температурой в материалах определяется по формуле

$$\sigma = RE_6 \beta \Delta t, \quad (4)$$

где σ — значение напряжений в момент времени t дней, $\text{Н}/\text{мм}^2$; R — размерный фактор ($0 < R < 1$), значение которого зависит от размеров бетонного блока и отношения модулей упругости бетона и грунта: $R = f(V_{\text{б}}, E_{\text{б}}/E_{\text{грунт}})$ и может быть рассчитано с помощью компьютерной программы Midas Civil; Δt — градиент температуры, $^\circ\text{C}$; β — коэффициент линейного термического расширения бетона, $1/^\circ\text{C}$; E_6 — модуль упругости бетона, $\text{Н}/\text{мм}^2$.

2. Результаты и обсуждение**Расчет состава бетонной смеси для мостовой опоры**

Необходимо определить состав бетонной смеси для получения тяжелого бетона, предназначенного для строительства мостовой опоры V-образной формы, изображенной на рис. 2, в северной части Вьетнама в летний период.

Разрабатываемый тяжелый бетон должен обладать:

- удобоукладываемостью бетонной смеси по осадке стандартного конуса ОК = 10–15 см;
- прочностью на сжатие в возрасте 28 сут порядка 40 МПа;

³ MIDAS Information Technology. Heat of Hydration – Analysis Manual. Version 2011, 256 p.

- возможностью использования золы рисовой шелухи для замены 10 % масс. цемента в бетонной смеси [23];

- относительным объемом вовлеченного воздуха не более 1 %.

Для определения предварительного состава бетонной смеси, обладающей указанной удобоукладываемостью и позволяющей получить бетон

с прочностью на сжатие 40 МПа в возрасте 28 сут нормального твердения, был использован стандарт ТCVN 9382–2012. Результаты испытаний бетонных смесей разработанного состава № 2 и состава сравнения № 1, а также бетонов на их основе приведены в табл. 1 и 2.

Из приведенных в табл. 1 и 2 экспериментальных результатов следует, что рассчитанный со-

Рис. 2. Схема бетонной мостовой опоры: а — трехмерная модель мостовой опоры V-образной формы; б — трехмерная конечно-элементная модель-сетка поперечного сечения конструкции; 1 — фундамент опоры моста; 2 — промежуточная вертикальная часть опоры; 3 — промежуточная наклонная часть опоры под углом 75°

Таблица 1

Состав и свойства бетонных смесей

№ состава	Расход материалов на 1 м ³ бетонной смеси, кг						Свойства бетонной смеси		
	Ц	ЗРШ	Вязущее ⁽¹⁾	П	Щ	В	$\frac{В}{Вязущее}^{(2)}$	Средняя расчетная плотность, кг/м ³	ОК, см
1	510	0	510	543	1096	225	0,44	2374	12
2	459	51	510	528	1096	225	0,44	2359	11

Примечания. ⁽¹⁾ Вязущее = Ц + ЗРШ. ⁽²⁾ Отношение $\frac{В}{Вязущее}$ указано по массе.

Таблица 2

Свойства бетонов

№ состава	Средняя прочность на сжатие в разных возрастах твердения, МПа				Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 сут, МПа	Средняя плотность бетона, кг/м ³
	3 сут	7 сут	14 сут	28 сут		
1	21	30	40	45	3,8	2365
2	18	27	38	43	3,5	2358

став бетонной смеси № 2 заданной удобоукладываемости позволяет получить бетон требуемой прочности на сжатие. Экономический эффект от снижения стоимости сырьевых материалов на 1 м³ бетона за счет замены в составе бетонной смеси 10 %масс. портландцемента на золу рисовой шелухи составит

$$51 \cdot (3,78 - 2,12) = 84,66 \text{ руб./м}^3.$$

Расчет температурного режима и термонапряжения в мостовой опоре при твердении бетона в нормальных условиях

Для оценки возможности трещинообразования в бетоне из-за выделения тепла при гидратации цемента с помощью компьютерной программы Midas Civil, основанной на методе конечных элементов, был проведен анализ температурного поведения бетонной опоры моста, изображенной на рис. 2, в ходе ее строительства, а также определено ее термонапряженное состояние. Состав разработанного бетона представлен в табл. 1.

Согласно результатам исследования [24] на ранней стадии гидратации цемента по причине неравномерного температурного поля в бетонном блоке между его центром и наружной поверхностью возникает температурный перепад, приводящий к появлению в нем растягивающего напряжения. По мнению авторов указанной работы, в качестве критерия оценки возможности возникновения трещин в теле бетонной конструкции в ходе твердения бетона может быть принята его прочность на растяжение при изгибе, и когда растягивающее напряжение в бетоне $\sigma_t(\tau_e)$ к моменту времени τ_e станет выше, чем его прочность на растяжение при изгибе $R_t(\tau_e)$, которой он достигнет к этому же моменту времени, то в бетоне образуются трещины. То есть если $R_t(\tau_e) < \sigma_t(\tau_e)$, то в бетоне монолитной конструкции будут возникать термические трещины из-за выделения тепла при гидратации цемента.

Температура укладываемой бетонной смеси составляла +25 °С, а температура грунта под сооружаемым бетонным фундаментом мостовой опоры была +20 °С. Температура воздуха во время укладки бетонной смеси и твердения бетона изменялась в диапазоне от +20 °С ночью до +30 °С днем и ее среднесуточное значение составляло +25 °С. Свойства тяжелого бетона разработанного состава, используемые в качестве входных данных для определения температурно-

го поведения и термонапряженного состояния в мостовой опоре, приведены в табл. 3.

С помощью компьютерной программы Midas Civil была получена расчетная кривая зависимости прочности бетона на растяжение при изгибе от времени нормального твердения, представленная на рис. 3.

Возведение исследованной мостовой опоры из монолитного бетона происходило в три этапа:

- этап 1: сооружение фундамента мостовой опоры;

Таблица 3

Характеристики тяжелого бетона разработанного состава

Показатели	Значения показателей
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С)	2,3
Удельная теплоемкость, кДж/(кг · °С)	1,05
Средняя плотность, кг/м ³	2358
Коэффициент теплопередачи с открытой поверхности «бетон – воздух», Вт/(м ² · °С)	13,88
Модуль упругости, Н/м ² [25]	$2,5 \cdot 10^{10}$
Коэффициент линейного термического расширения, 1/°С [26]	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент Пуассона [26]	0,20
Максимальное тепловыделение при гидратации цемента, кДж/кг	309
Расход цемента, кг/м ³	459
Средняя прочность на сжатие, МПа	43
Средняя прочность на растяжение при изгибе, МПа	3,5

Рис. 3. График изменения прочности бетона на растяжение при изгибе в ходе его твердения

- этап 2: сооружение промежуточной вертикальной части мостовой опоры от поверхности ее фундамента на высоту +4,5 м;

- этап 3: сооружение промежуточной наклонной части опоры с высоты +4,5 м до высоты +8,5 м.

Поскольку опора моста обладает свойствами симметрии и чтобы уменьшить количество вычислений, была проанализирована половина ее поперечного сечения, трехмерная конечно-элементная модель-сетка, которая изображена на рис. 2, б.

Результаты анализа температурного и термонапряженного состояния на всех трех этапах строительства мостовой опоры представлены на рис. 4–7.

Из полученных результатов, изображенных на рис. 4, следует, что максимальная температура в центре бетонного фундамента опоры после 96 ч твердения бетона составляет $T_{\max} = 73,61^\circ\text{C}$.

Спустя 96 ч температура начинает снижаться (рис. 4, а). На рис. 4, б видно, что максимальное растягивающее напряжение на наружной поверхности и в верхней части фундамента достигает 4,46 МПа, что превышает прочность на растяжение при изгибе разработанного бетона, которая составляет 3,5 МПа (см. табл. 3). То есть на наружной поверхности и в верхней части бетонного фундамента мостовой опоры создаются условия для образования трещин.

Для более глубокого изучения этого вопроса был проведен анализ температурного режима и термонапряженного состояния в трех опасных местах исследуемой конструкции, включающих местоположения в центре — узел № 788, на наружной поверхности в верхней части конструкции — узел № 148, а также на ее наружной левой боковой поверхности — узел № 773 (рис. 5, а). Результаты анализа температурных градиентов

Рис. 4. Температурный режим (а) и термонапряженное состояние (б) в центре бетонной фундаментной опоры моста на первом этапе строительства (через 96 ч от начала ее возведения)

Рис. 5. Схема расположения исследованных опасных мест (а) и график изменения температуры во времени (б) в центре (узел № 788) и на поверхностях (узлы № 148 и 773) бетонной фундаментной мостовой опоры

в указанных опасных местах изображены на рис. 5, б.

Из приведенных на рис. 5 результатов следует, что перепады температур между центром — узел № 788 и поверхностями — узлы № 148 и 773 бетонного фундамента мостовой опоры, причинами которых является неравномерность распределения и разные условия отвода тепла, выделяющегося в ходе гидратации вяжущего, в его центральной части и на внешних поверхностях, по истечении 96 ч твердения бетона составляют соответственно 33,4 и 34,7 °С. Такие перепады температур могут привести к возникновению чрезмерных напряжений из-за появления экстремальных температурных градиентов при гидратации вяжущего вещества, результатом которых зачастую становится появление трещин в центре конструкции. Температурный скачок в узле № 148, расположенном на верхней поверхности фундаментного блока мостовой опоры, наблюдаемый на 263-м часу твердения бетона (рис. 5, б), можно объяснить поступлением тепла в ходе твердения бетона из сооружаемой на нем промежуточной вертикальной части опоры.

Из полученных результатов, представленных на рис. 6, следует, что максимальная температура в центре промежуточной вертикальной части опоры после 288 ч твердения бетона составляет $T_{\max} = 70,42$ °С, после чего температура тоже начинает снижаться (рис. 6, а). На рис. 6, б отчетливо видно, что максимальное растягивающее напряжение на боковых наружных поверхностях вертикальной части мостовой опоры, равное

2,92 МПа, меньше, чем прочность на растяжение при изгибе разработанного бетона (табл. 3). Таким образом, в теле вертикальной части опоры моста не возникают условия для появления трещин из-за выделения тепла при гидратации вяжущего вещества.

Из полученных результатов, приведенных на рис. 7, следует, что максимальная температура в центре промежуточной наклонной части опоры после 456 ч твердения бетона составляет $T_{\max} = 59,52$ °С (рис. 7, а). Такое невысокое значение температуры в центре этой части конструкции мостовой опоры объясняется сравнительно небольшой площадью ее поперечного сечения, благодаря чему тепло быстрее рассеивается в окружающую среду. На рис. 7, б видно, что максимальное растягивающее напряжение, возникающее на наружной боковой поверхности наклонной части мостовой опоры, равное 2,28 МПа, не превышает прочность на растяжение при изгибе разработанного бетона (см. табл. 3). Таким образом, в теле этой части бетонной конструкции тоже не возникают условия для появления термических трещин.

Выводы

1. Доказана возможность получения тяжелого бетона из местных для Вьетнама сырьевых материалов, пригодного для сооружения V-образных мостовых опор, с удобоукладываемостью бетонной смеси по осадке стандартного конуса 10–15 см, обладающего средней прочностью на сжатие порядка 40 МПа и прочностью на растя-

Рис. 6. Температурный режим (а) и термонапряженное состояние (б) в центре промежуточной вертикальной части мостовой опоры на втором этапе строительства (через 288 ч от начала ее возведения)

Рис. 7. Температурный режим (а) и термонапряженное состояние (б) в центре промежуточной наклонной части мостовой опоры на третьем этапе строительства (через 456 ч от начала ее возведения)

жение при изгибе не менее 3,5 МПа в возрасте 28 сут нормального твердения.

2. С использованием компьютерной программы Midas Civil были определены максимальные температуры в центральных зонах бетонной конструкции мостовой опоры V-образной формы на всех трех этапах ее возведения, равные, соответственно, 73,61 °C через 96 ч, 70,42 °C через 288 ч и 59,52 °C через 456 ч от начала строительства. По истечении 96 ч твердения бетона перепады температур между центром — узел № 788 и поверхностями — узлы № 148 и 773 бетонного фундамента мостовой опоры составляют, соответственно, 33,4 °C и 34,7 °C, и возникающее растягивающее напряжение как на наружной поверхности, так и в верхней части фундамента превышает прочность на растяжение при изгибе разработанного бетона. Поэтому в этих местах фундамента мостовой опоры появляются условия для образования трещин, для предотвращения появления которых в состав бетонной смеси, предназначенной для формирования фундаментной части мостовых опор, следует добавлять поверхностно-активные вещества, с помощью которых можно замедлить гидратацию цемента и тем самым снизить интенсивность тепловыделения в ходе твердения бетона и величину возникающих в его теле термических напряжений до безопасного уровня.

3. При дальнейшем твердения бетона, спустя 288 и 456 ч, максимальное растягивающее напряжение, возникающее на наружной поверхности

промежуточных вертикальной и наклонной частей мостовой опоры, не превышает прочность на растяжение при изгибе разработанного бетона. Таким образом, выделение тепла при гидратации вяжущего не может привести к образованию трещин в теле промежуточной части бетонной опоры моста.

Библиографический список

1. Ле Хоанг Ха. Исследования работы криволинейных плитных эстакад со столбчатыми опорами в условиях Вьетнама: дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 183 с.
2. Попов В. И. Городские мосты и транспортные развязки. М.: МАДИ, 2009. Ч. 1. 145 с.
3. Попов В. И. Опоры эстакад, транспортных пересечений и развязок. Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. 120 с.
4. Боровиков А. Г., Кузьменков Е. А. (сост.) Проектирование фундамента промежуточной опоры моста. Томск: ТГАСУ, 2010. 46 с.
5. Наумов Г. Г., Андрианов Ю. А. Вариантное проектирование моста. М.: МАДИ, 2007, 60 с.
6. Milenko Przulj. Up to Date Concept of Overpasses on Motorway // Proceedings of the 7th International Conference on Short and Medium Span Bridges. Canada. Quebec. Montreal. 2006. August. Pp. 124–137.
7. Lee Y., Kim J-K. Numerical analysis of the early age behavior of concrete structures with a hydration based microplane model // Computers & Structures. 2009. Vol. 87, Issue 17–18. Pp. 1085–1101.
8. Tang Van Lam, Nguyen Trong Chuc, Ngo Xuan Hung, Dang Van Phi, Bulgakov B. I., Bazhenova S. I. Effect of

natural pozzolan on strength and temperature distribution of heavyweight concrete at early ages // International Scientific Conference «Environmental Science for Civil Engineering and Architecture. 2018. Vol. 193. 11 p.

9. Cui W., Chen W., Wang N. Thermo-hydro-mechanical coupling analysis of early-age concrete with behavioral changes considered and its application // China Civil Engineering Journal. 2015. Vol. 48(2). Pp. 44–53.

10. Tang Van Lam, Nguyen Trong Chuc, Boris Bulgakov, Pham Ngoc Anh. Composition and early-age temperature regime in massive concrete foundation // MATEC Web of Conferences 196, 04017 (2018).

11. Yuan Y., Wan Z. L. Prediction of cracking within early-age concrete due to thermal, drying and creep behavior // Cement & Concrete Research. 2002. Vol. 32 (7). Pp. 1053–1059.

12. Wu Y., Luna R. Numerical implementation of temperature and creep in mass concrete// Finite Elem. Anal. Des. 2001. Vol. 37(2). Pp. 97–106.

13. Amin M. N., Kim J.-S., Lee Y., Kim J.-K. Simulation of the thermal stress in mass concrete using a thermal stress measuring device // Cement & Concrete Research. 2009. Vol. 39(3). Pp. 154–164.

14. Lawrence A. M. A finite element model for the prediction of thermal stresses in mass concrete. PhD thesis. University of Florida, 2009. 177 p.

15. Van Breugel K., Koenders E. A. B. Effect on solar radiation on the risk of cracking in young concrete. Delft University of Technology, 2001. Report BE96-3843.

16. Kjellman O., Olofsson J. 3D structural analysis of crack risk in hardening concrete structures. Verification of a three-step engineering method. 1999. Contract No.: TG 4/N2.

17. Нгуен Чонг Чык, Танг Ван Лам, Булгаков Б. И., Александрова О. В., Ларсен О. А., Булычева А. С., Макарова М. Н. Оценка возможности появления трещин в мостовой опоре автомобильной эстакады в раннем возрасте твердения бетона // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2018. № 10. С. 15–25.

18. Копылов В. Д., Нгуен Куи Дык, Хо Нгок Кхоа. Физические процессы, протекающие в твердеющем в жарком климате бетоне // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 5. С. 45–52.

19. M. Naji, A. R. Khalim. Integral Abutment Bridges – Development of Soil Model for Soil Structure Interaction in Time History Analysis // Journal of Engineering Research and Development. 2014. Vol. 10. Issue 3. Pp. 31–40.

20. Aniskin N. A., Chuc Nguyen Trong. The thermal stress of roller-compacted concrete dams during construction, MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. 04059.

21. Chuc N. T., Lam T. V., Bulgakov B. I. Designing the composition of concrete with mineral additives and assessment of the possibility of cracking in cement-

concrete pavement // Materials Science Forum. 2018. Vol. 931.

22. Zhu Bofang. Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete. Published by Elsevier Inc. 2014. 497 p.

23. Tang Van Lam, Bulgakov B., Aleksandrova O., Larsen O., Pham Ngoc Anh. Effect of rice husk ash and fly ash on the compressive strength of high performance concrete, E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 33, Issue 02030.

24. Diaz F., Johansson R. Early-Age Thermal Cracking in Concrete: A FE-Modelling approach: Master's Thesis in the Master's Programme in Structural Engineering and Building Technology. Göteborg, Sweden, 2016. 161 p.

25. Hichem Mazighi, Mustapha Kamel Mihoubi, Khaled Ghaedi, Zainah Ibrahim. Study of uplift pressure effect in roller compacted concrete gravity dam // 37th Annual USSD Conference Anaheim, California, 2017. 20 p.

26. Abdallah I. Husein Malkawi, Saad A. Mutasher, Tony J. Qiu. Thermal-Structural Modeling and Temperature Control of Roller Compacted Concrete Gravity Dam // Journal of Performance of Constructed facilities. November, 2003. Vol. 17, Issue 4. Pp. 177–187.

References

1. Le Khoang Kha. *Issledovaniya raboty krivolineynykh plitnykh ehstakad so stolbchatymi oporami v usloviyakh V'etnama*. Diss. kand. tekhn. nauk [Research of work of curvilinear plate racks with columnar supports in the conditions of Vietnam]. Moscow, 2007, 183 p.

2. Popov V. I. *Gorodskie mosty i transportnye razvyazki* [City bridges and transport interchanges]. Moscow, MADI Publ., 2009, Pt. 1, 145 p.

3. Popov V. I. *Opory ehstakad, transportnykh peresecheniy i razvyazok* [Supports of bridges, traffic intersections and interchanges]. Cheboksary, Interaktiv plus Publ., 2016, 120 p.

4. Borovikov A. G., Kuz'menkov E. A. *Proektirovanie fundamenta promezhutchnoy opory mosta* [Design of the intermediate supports of the bridge foundation]. Tomsk, TGASU Publ., 2010, 46 p.

5. Naumov G. G., Andrianov Yu. A. *Variantsnoe proektirovanie mosta* [Trial design of the bridge]. Moscow, MADI Publ., 2007, 60 p.

6. Milenko Przulj. Up to Date Concept of Overpasses on Motorway. *Proceedings of the 7th International Conference on Short and Medium Span Bridges*. Canada. Quebec. Montreal. 2006, August, pp. 124–137.

7. Lee Y., Kim J.-K. Numerical analysis of the early age behavior of concrete structures with a hydration based microplane model. *Computers & Structures*, 2009, vol. 87, iss. 17–18, pp. 1085–1101.

8. Tang Van Lam, et al. Effect of natural pozzolan on strength and temperature distribution of heavyweight

concrete at early ages. *International Scientific Conference «Environmental Science for Civil Engineering and Architecture*, 2018, vol. 193, 11 p.

9. Cui W., Chen W., Wang N. Thermo-hydro-mechanical coupling analysis of early-age concrete with behavioral changes considered and its application. *China Civil Engineering Journal*, 2015, vol. 48(2), pp. 44–53.

10. Tang Van Lam, et al. Composition and early-age temperature regime in massive concrete foundation. *MATEC Web of Conferences* 196, 04017 (2018).

11. Yuan Y., Wan Z. L. Prediction of cracking within early-age concrete due to thermal, drying and creep behavior. *Cement & Concrete Research*, 2002, vol. 32 (7), pp. 1053–1059.

12. Wu Y., Luna R. Numerical implementation of temperature and creep in mass concrete. *Finite Elem. Anal. Des.*, 2001, vol. 37(2). pp. 97–106.

13. Amin M. N., Kim J.-S., Lee Y., Kim J.-K. Simulation of the thermal stress in mass concrete using a thermal stress measuring device. *Cement & Concrete Research*, 2009, vol. 39(3), pp. 154–164.

14. Lawrence A. M. *A finite element model for the prediction of thermal stresses in mass concrete*. PhD thesis. University of Florida, 2009, 177 p.

15. Van Breugel K., Koenders E. A. B. *Effect on solar radiation on the risk of cracking in young concrete*. Delft University of Technology, 2001. Report BE96-3843.

16. Kjellman O., Olofsson J. *3D structural analysis of crack risk in hardening concrete structures. Verification of a three-step engineering method*. 1999, contract no. TG 4/N2.

17. Nguen Chong Chyk, et al. *Otsenka vozmozhnosti poyavleniya treshchin v mostovoy opore avtomobil'noy ehstakady v rannem vozraste tverdeniya betona* [Assessment of the possibility of cracks in the bridge support of the automobile overpass at an early age of concrete hardening]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2018, no. 10, pp. 15–25.

18. Kopylov V. D., Nguen Kui Dyk, Kho Ngok Kkhoa. *Fizicheskie protsessy, protekayushchie v tverdeyushchem v zharkom klimate betone* [Physical processes occurring in the concrete hardening in hot climate]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2012, no. 5, pp. 45–52.

19. M. Naji, A. R. Khalim. Integral Abutment Bridges – Development of Soil Model for Soil Structure Interaction in Time History Analysis. *Journal of Engineering Research and Development*, 2014, vol. 10, iss. 3, pp. 31–40.

20. Aniskin N. A., Chuc Nguyen Trong. The thermal stress of roller-compacted concrete dams during construction. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 196, 04059.

21. Chuc N. T., Lam T. V., Bulgakov B. I. Designing the composition of concrete with mineral additives and assessment of the possibility of cracking in cement-concrete pavement. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 931.

22. Zhu Bofang. *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*. Published by Elsevier Inc. 2014, 497 p.

23. Tang Van Lam, et al. Effect of rice husk ash and fly ash on the compressive strength of high performance concrete. *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 33, 02030.

24. Diaz F., Johansson R. *Early-Age Thermal Cracking in Concrete: A FE-Modelling approach*. Master's Thesis in the Master's Programme in Structural Engineering and Building Technology. Göteborg, Sweden, 2016, 161 p.

25. Hichem Mazighi, Mustapha Kamel Mihoubi, Khaled Ghaedi, Zainah Ibrahim. Study of uplift pressure effect in roller compacted concrete gravity dam. *Proc. of the 37-th Annual USSD Conference Anaheim, California*, 2017, 20 p.

26. Abdallah I. Husein Malkawi, Saad A. Mutasher, Tony J Qiu. Thermal-Structural Modeling and Temperature Control of Roller Compacted Concrete Gravity Dam. *Journal of Performance of Constructed facilities*, 2003, November, vol. 17, iss. 4, pp. 177–187.