

**ГИДРАВЛИКА. ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ.
ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

УДК 627.82+693.5

N.A. Aniskin, Nguen Hoang

Н.А. Анискин, Нгуен Хоанг
*ФГБОУ ВПО «МГСУ»***ПРОГНОЗ
ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ
БЕТОННЫХ МАССИВНЫХ
ПЛОТИН ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ
В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ
УСЛОВИЯХ**

Представлена созданная математическая модель температурного режима послойно укладываемого бетонного массива в зависимости от основных влияющих факторов. Использование такой модели позволит определять желаемые составы бетонной смеси и технологию ее укладки, прогнозировать возможность трещинообразования в соответствии с определением возникающих температурных перепадов.

Ключевые слова: массивный бетон, перепад температуры, трещинообразование, суровый климат, температурный режим.

Бетонные гравитационные и массивно-контрфорсные плотины являются наиболее распространенным типом водоподпорных сооружений в районах с суровыми климатическими условиями. В качестве примера можно привести бетонные плотины Братской, Красноярской, Мамаканской, Зейской ГЭС (Российская Федерация), плотина Даниэль Джонсон (Канада). В плотинах такого типа, как и в других массивных бетонных плотинах в период возведения, одной из основных проблем является температурное трещинообразование. Основные меры борьбы с трещинообразованием в массивном бетоне были разработаны еще в 1930-х гг., когда интенсивно развивалось бетонное

**PREDICTING CRACK
FORMATION IN SOLID
CONCRETE DAMS
IN SEVERE CLIMATIC
CONDITIONS DURING
CONSTRUCTION PERIOD**

In this paper we attempt to create a mathematical temperature model of concreting in lifts, that depends on the various fundamental factors. The use of such a model will help to determine concrete composition (cement consumption and heat generation) and the technological scheme of building solid concrete dams. As a result of the analysis of various factors influence on the temperature during a construction concreting, we obtained a mathematical model, allowing to determine the maximum temperature inside the concrete block body and temperature variations.

Key words: solid concrete, temperature variations, crack formation, severe climatic, temperature conditions.

Concrete gravity and solid counterfort dams are the most common type of backwater structures in the regions with harsh climatic conditions. The examples are concrete dams of Bratsk, Krasnoyarsk, Mamakansk, Zeysk hydroelectric power stations (Russian Federation), Daniel Johnson dam (Canada). The main problem of such dams, as well as other concrete solid dams during the construction, is crack formation. Key measures with cracks in the solid concrete were developed in 1930s, during intensive concrete dam construction.

плотиностроение. Сегодня они дополнены и усовершенствованы, однако проблема трещинообразования все еще не может считаться решенной. Температурное трещинообразование наблюдается во многих современных плотинах, в т.ч. и в возведенных по технологии укатанного бетона с малым количеством цемента [1, 2]. Эта проблема особенно остро стоит для плотин, строящихся в суровом климате, где диапазон годовых изменений температуры воздуха может достигать почти 100 °C. Так, в районе Мамаканской ГЭС температура самого холодного месяца — января — падает до -60 °C, а самого теплого — июля — поднимается до 37 °C.

Возникновение трещин в строительный период часто связано с ошибками в проектировании состава бетонов и режимов возведения плотины. В данной работе описано создание математической прогнозной модели температурного режима послойно укладываемого бетонного массива в зависимости от основных действующих факторов. Использование такой модели позволит принимать рациональные решения по составу бетонов (расходу цемента и его тепловыделению) и технологической схеме возведения бетонных плотин (интенсивность возведения плотины по высоте, толщина укладываемого слоя бетона). Попытки создания аналогичных математических моделей предпринимались ранее, однако, они рассматривали конкретные объекты и условия возведения и ограниченное количество влияющих на процесс факторов [3, 4].

В данной работе рассмотрено возведение бетонного столба различной толщины (приняты варианты с толщиной 10 и 20 м) на массиве основания (рис. 1). Принята скорость возведения массива по высоте, равная 0,6 м/сут (часто встречающаяся в современной практике плотиностроения). На поверхности расчетной области по контакту основание — воздух

Nowadays they are updated and improved, but the problem of crack formation still exists. Thermal cracking is observed in many modern dams, including those built with rolled concrete technology with a small amount of cement [1, 2]. This problem is especially acute for dams built in severe climatic conditions, where annual temperature variations can reach almost 100 °C. So, near Mamakansk HPS the temperature in the coldest month — January — is falling down to -60 °C, and the warmest — July — rises up to 37 °C.

Crack forming during construction is often associated with errors in concrete composition and dam construction modes. This paper describes the development of the mathematical forecasting of temperature model of concreting in stacks depending on the main acting factors. The use of this model will allow rational concrete composing (cement consumption and heat emission) and technological scheme of concrete dam construction (intensity of dam construction height along, thickness of a concrete layer). There have been a number of attempts to create similar mathematical models; however, they consider the specific objects and terms of erection and a limited number of acting factors [3, 4].

This article considers the erection of concrete pillars of different thickness (variants with thickness of 10 and 20 m are adopted) on a mass basis (Fig. 1). The speed of constructing dam body is assumed equal to 0.6 m/day (often used in modern dam building). On the surface of the computational region at the joints "foundation — air" and

и бетон — воздух (верхняя горизонтальная и боковые вертикальные поверхности наращиваемого массива) задавались граничные условия III рода с коэффициентом теплопередачи $\beta = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$. Для решения подобных задач в последние годы широко используются численные методы [5—7]. В данной работе решение температурной задачи проводилось с использованием метода конечных элементов (МКЭ) по методике и программе расчета температурных режимов бетонных сооружений [8, 9].

"concrete — air" (upper horizontal and and vertical lateral surfaces of the increasing body) we defined boundary conditions of the third kind with heat emission coefficient $\beta = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{°C})$. For solving similar problems nowadays numerical methods are widely used [5—7]. In our work we solve the temperature problem with the use of finite element method (FEM) by the method and program of calculating temperature behavior of concrete structures [8, 9].

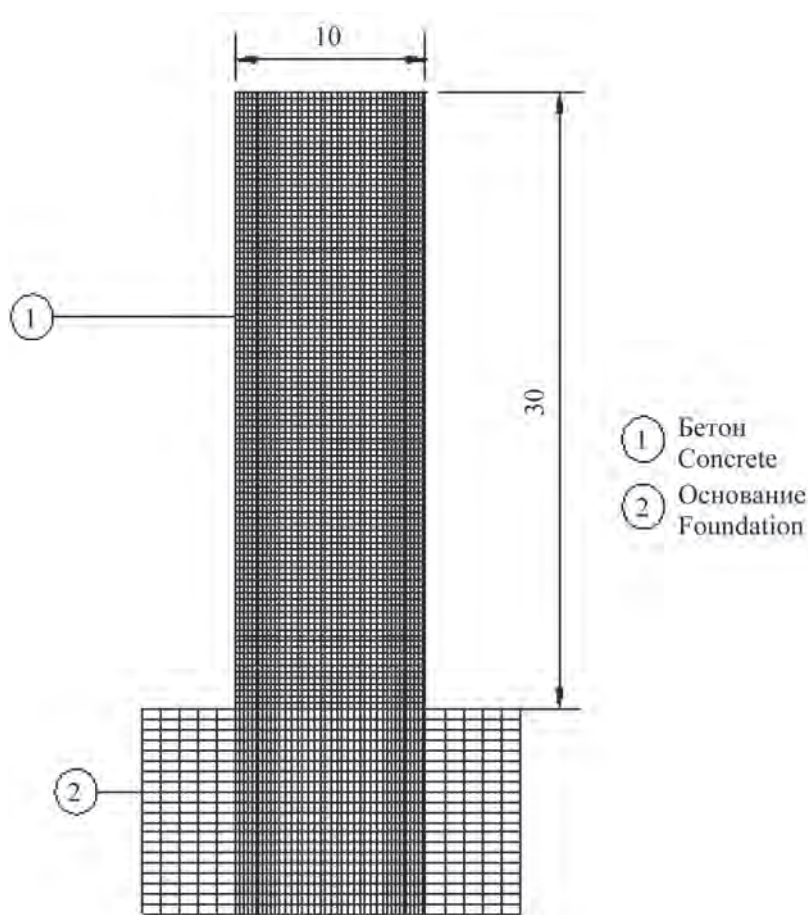


Рис. 1. Сетка МКЭ-разбивки бетонного массива и основания на конечные элементы

Fig. 1. Finite element grid of concrete body and foundation

Расчеты проведены для двух случаев температурного воздействия воздушной среды. Рассматривались весенне-летний период с температурой воздуха 20 °C и

The calculations are made for two cases of external effects. We considered the spring and summer period, with temperatures of 20 °C

осенне-зимний — с температурой воздуха 5 °С (предусматривается возведение столба в зимних условиях под защитой тепляков). Принимались следующие теплофизические характеристики бетона: коэффициент теплопроводности $\beta = 2,23$ Вт/(м°С); коэффициент температуропроводности $a = 0,0042$ (м²/ч). Характеристики основания принимались аналогичными.

Расчеты тепловыделения бетона производились по формуле, учитывающей влияние времени и температуры на тепловыделение бетона [10]:

$$Q_{\tau} = Q_{\max} \left[1 - \left(1 + A_{20} \int_0^{\tau} 2^{\frac{t(\tau)-20}{\varepsilon}} d\tau \right)^{-0,833} \right], \quad (1)$$

где Q_{τ} — тепловыделение цемента в рассматриваемый момент времени τ ; $Q_{\max}$ — максимальное (полное) тепловыделение цемента; A_{20} — коэффициент темпа тепловыделения бетона при постоянной температуре твердения $t = 20$ °С, $A_{20} = 0,014$ ч⁻¹ (по рекомендациям [10]); ε — характерная температурная разность обычно принимается равной 10 °С [10].

В настоящей работе для построения прогнозной модели использовалась методика планирования экспериментов. Рассматривался полнофакторный эксперимент, для которого функция откликов принимает следующий вид [11]:

$$Y_i = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 + b_{1234} X_1 X_2 X_3 X_4. \quad (2)$$

В качестве факторов в проведенных исследованиях рассматривались следующие величины: X_1 — расход цемента (варьировался от 200 до 350 кг/м³); X_2 — толщина укладываемого слоя бетона (от 1,0 до 3,0 м); X_3 — температура укладываемого бетона (от 10 до 22 °С); X_4 — полное тепловыделение цемента

and autumn-winter period with temperature of 5 °С (considering the construction of pole in winter conditions under protection of enclosures). We took the following thermophysical parameters of the concrete: heat conductivity coefficient $\beta = 2.23$ W/(m°С); temperature conductivity coefficient $a = 0.0042$ (m²/h). Base parameters were similar.

In calculating heat emission of concrete we used the formula that considers time and temperature influence on the heat emission of concrete [10]:

where Q_{τ} — heat emission of cement at a given moment of time τ ; $Q_{\max}$ — the maximum (full) heat emission of cement; A_{20} — speed coefficient of heat emission of concrete at a constant temperature of solidifying $t = 20$ °С, $A_{20} = 0.014$ h⁻¹ (recommended [10]); ε — the characteristic temperature difference usually equal to 10 °С [10].

In order to build a forecasting model in our work we used the method of planning experiments. We considered full factor experiment, for which the response function takes the following form [11]:

As factors in the researches we considered the following values: X_1 — cement consumption (varied from 200 to 350 kg/m³); X_2 — concrete layer thickness (from 1.0 to 3.0 m); X_3 is concrete temperature (from 10 to 22 degrees); X_4 is a full heat emission of cement

(от 350 до 500 кДж/кг). В качестве откликов рассматривались перепад между максимальной температурой в бетонном массиве и температурой на его поверхности Δt . При этом были выделены две зоны массива [12, 13]: прискальная зона «защемления» (зона у основания с высотой, равной половине ширины блока); «свободная» зона (удаленная от основания). План эксперимента и результаты расчетов в соответствующих точках плана приведены в таблице. Также приведены значения максимальных температур в возводимом бетонном массиве $t_{\max}$ в таблице. В результате обработки результатов эксперимента были получены функции откликов в виде полиномов, позволяющие определять перепады температур в зависимости от значений рассмотренных факторов. Функции откликов имеют следующий вид при температуре наружного воздуха 5 °C в «свободной» зоне массива:

$$\Delta t = 40,94 + 8,54X_1 + 1,63X_2 + 5,26X_3 + 5,51X_4 + 0,35X_1X_2 + 1,51X_1X_4 + 0,2X_2X_3 + 0,23X_2X_4 + 0,05X_1X_2X_4; \quad (3)$$

в зоне «защемления» массива:

In the "crushing" area:

$$\Delta t = 36,28 + 7,08X_1 + 1,85X_2 + 5,59X_3 + 4,46X_4 + 0,5X_1X_2 + 0,14X_1X_3 + 1,24X_1X_4 + 0,11X_2X_3 + 0,24X_2X_4 + 0,03X_3X_4 - 0,14X_1X_2X_3 + 0,02X_1X_3X_4 + 0,1X_1X_2X_4 - 0,02X_2X_3X_4; \quad (4)$$

при температуре наружного воздуха 20 °C в «свободной» зоне массива:

at outdoor temperature of 20 °C in the "free" area of the body:

$$\Delta t = 27,98 + 8,52X_1 + 1,11X_2 + 5,09X_3 + 5,52X_4 + 0,34X_1X_2 + 0,03X_1X_3 + 1,51X_1X_4 + 0,22X_2X_3 + 0,22X_2X_4 + 0,06X_1X_2X_4; \quad (5)$$

в зоне «защемления» массива:

In the "crushing" area:

$$\Delta t = 22,65 + 7,05X_1 + 1,3X_2 + 5,56X_3 + 4,64X_4 + 0,5X_1X_2 + 0,14X_1X_3 + 1,26X_1X_4 + 0,09X_2X_3 + 0,26X_2X_4 + 0,03X_3X_4 - 0,14X_1X_2X_3 + 0,02X_1X_3X_4 + 0,09X_1X_2X_4 - 0,03X_2X_3X_4. \quad (6)$$

Аналогичные функции откликов были получены и для максимальных температур в бетонном массиве. Проверка адекватности (расчет 17 в табл.) показала хорошую сопоставимость полученных функций откликов с расчетами. На основе полу-

Similar response functions were obtained for the maximum temperatures in the concrete body. Test for adequacy (calculation 17 in the tab.) showed good comparability of the obtained response functions with calculations. On

ченных зависимостей построены номограммы [14], позволяющие определить значения температуры или перепада температур в бетонном массиве в зависимости от рассмотренных факторов. Номограммы также позволяют решить и обратную задачу: по величине желаемой температуры определить необходимые значения факторов. Пример построенных номограмм представлен на рис. 2, 3.

Матрица планирования экспериментов (расход цемента 200...350 кг/м³, толщина слоя 1,0...3 м, температура укладываемой бетонной смеси 10...22 °С, максимальное тепловыделение 350...500 кДж/кг)

the basis of the obtained dependencies we built charts [14], which help to determine temperature values or temperature variations in concrete body depending on the considered factors. Nomograms also allow us to solve the inverse problem: to determine the required factor values by the desired temperature values. The example of the chart is presented in Fig. 2, 3.

Planning matrix experiments (cement consumption of 200 to 350 kg/m³ and layer thickness of 1,0...3 m, temperature of concrete composition 10...22 °С, maximum heat emission 350...500 kJ/kg)

№	Ядро плана / Plan core									Температура t, °С / Temperature t, °C							
										Зона «защемления» / "Crushing" area				«Свободная» зона / "Free" area			
										t _{воз} = 5, °С		t _{воз} = 20, °С		t _{воз} = 5, °С		t _{воз} = 20, °С	
	X ₀	X ₁	Z ₁ , кг/м³ kg/m³	X ₂	Z ₂ , м m	X ₃	Z ₃ , °С °C	X ₄	Z ₄ , кДж/ кг kJ/kg	t _{max}	Δt	t _{max}	Δt	t _{max}	Δt	t _{max}	Δt
1	+	–	200	–	1	–	10	–	350	24,4	21,4	26,4	23,4	27,2	22,2	30,0	10,0
2	+	+	350	–	1	–	10	–	350	34,8	31,8	36,7	33,7	40,7	35,7	43,4	23,4
3	+	–	200	+	3	–	10	–	350	26,3	23,3	27,2	24,2	29,0	24,0	30,8	10,8
4	+	+	350	+	3	–	10	–	350	38,8	35,8	39,6	36,6	43,7	38,7	45,3	25,3
5	+	–	200	–	1	+	22	–	350	34,8	31,8	36,8	33,7	37,4	32,4	39,7	19,7
6	+	+	350	–	1	+	22	–	350	46,2	43,2	48,0	45,0	50,8	45,8	53,2	33,2
7	+	–	200	+	3	+	22	–	350	37,7	35,7	38,5	35,5	40,0	35,0	41,3	21,3
8	+	+	350	+	3	+	22	–	350	50,2	47,2	50,9	47,9	54,6	49,6	56,0	36,0
9	+	–	200	–	1	–	10	+	500	30,9	27,9	32,8	39,8	34,9	29,9	37,7	17,7
10	+	+	350	–	1	–	10	+	500	45,7	47,7	47,6	44,6	54,2	49,2	56,9	36,9
11	+	–	200	+	3	–	10	+	500	33,4	30,4	34,3	31,3	37,4	32,4	39,1	19,1
12	+	+	350	+	3	–	10	+	500	51,0	48,2	52,1	49,1	58,3	53,3	59,9	39,9
13	+	–	200	–	1	+	22	+	500	41,3	38,3	43,2	40,2	45,0	40,0	47,4	27,4
14	+	+	350	–	1	+	22	+	500	57,4	54,4	59,3	56,3	64,3	59,3	66,7	46,7
15	+	–	200	+	3	+	22	+	500	44,8	41,8	45,6	42,6	48,3	43,3	49,7	29,7
16	+	+	350	+	3	+	22	+	500	62,7	59,7	63,4	60,4	69,2	64,2	70,6	50,6
17*	+	0	275	0	2	0	16	0	425	42,5	39,5	43,2	40,6	46,7	41,7	47,9	28,5

* Проверка адекватности

* Test for adequacy

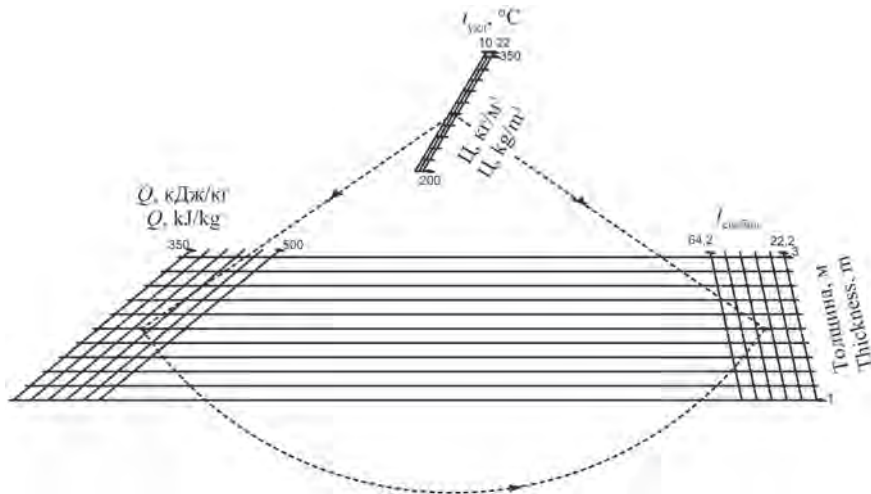


Рис. 2. Номограмма для определения перепада между максимальной температурой в центре блока и температурой бетона на гранях блока для «свободной» зоны ($t_{\text{воз}} = 5^\circ\text{C}$, расход цемента 200...350 $\text{кг}/\text{м}^3$, Q_{max} 350...500 $\text{кДж}/\text{кг}$)

Fig. 2. Chart for determining the difference between the maximum temperature in the center of the block and concrete temperature on the block faces for "free" areas ($t_{\text{воз}} = 5^\circ\text{C}$, cement consumption of 200 to 350 kg/m^3 , Q_{max} 350...500 kJ/kg)

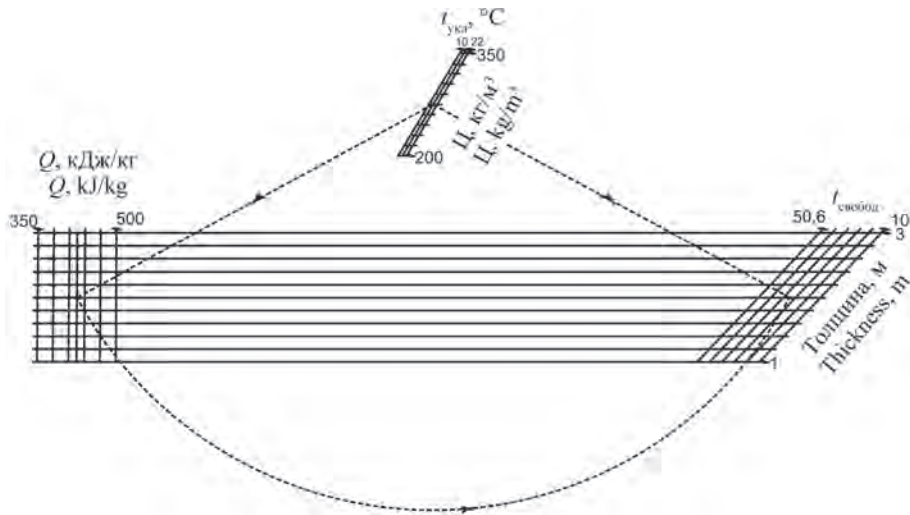


Рис. 3. Номограмма для определения перепада между максимальной температурой в центре блока и температурой бетона на гранях блока для «свободной» зоны ($t_{\text{воз}} = 20^\circ\text{C}$, расход цемента 200...350 $\text{кг}/\text{м}^3$, Q_{max} 350...500 $\text{кДж}/\text{кг}$)

Fig. 3. Chart for determining the difference between the maximum temperature in the center of the block and concrete temperature on the block faces for "free" areas ($t_{\text{воз}} = 20^\circ\text{C}$, cement consumption 200 to 350 kg/m^3 , Q_{max} 350...500 kJ/kg)

Одним из основных факторов, определяющих возможность и степень температурного трещинообразования в наращиваемом бетонном

One of the main factors, determining the possibility and the degree of thermal crack forming in increasing concrete body is the temperature variability. For

массиве, является перепад температур. Для бетона, находящегося в зоне «защемления», одной из основных причин трещинообразования является перепад между максимальной температурой в массиве в период экзотермии и осредненной температурой в период эксплуатации. Для бетона в «свободной» зоне — перепад между максимальной температурой в массиве в период экзотермии и температурой на поверхности блока.

Расчеты термонапряженного состояния бетонных массивов при их возведении являются достаточно трудоемкой задачей, которая сегодня решается, как правило, с помощью специальных вычислительных программ [15, 16]. В результате многолетней практики проектирования и инженерных расчетов выработана доступная методика оценки возможного трещинообразования, которая дает приемлемые для предварительных расчетов результаты [12, 13]. В соответствии с этой методикой величину допустимого температурного перепада максимальных температур в блоке можно выразить следующим образом [12]

$$[\Delta T_6^{\max}] = [\Delta T_6^{\text{cp}}] K_{\text{м. перех}}, \quad (7)$$

где $K_{\text{м. перех}}$ — коэффициент перехода от средней температуры в блоке в период экзотермии к максимальной; $[\Delta T_6^{\text{cp}}]$ — допустимый температурный перепад средних температур в блоке. Величина коэффициента $K_{\text{м. перех}}$ зависит от условий теплообмена блока с окружающей средой и определяется по результатам расчета температурного поля (в нашем случае $K_{\text{м. перех}} = 1,5$).

Допустимый температурный перепад средних температур в блоке может быть определен по формуле [12]

concrete, in the "crushing" area, one of the main causes of cracking is the difference between the maximum temperature in the body in heat evolution period and averaged temperature during operation. For concrete in "free" zone — the difference between the maximum temperature in the body in the heat evolution period and temperature on the block surface.

Calculations of thermostressed state of the concrete bodies during construction are rather time-consuming, which is usually solved nowadays with the help of special computer programs [15, 16]. As a result of long-term experience of design and engineering calculations the methods of assessment of possible crack forming were elaborated, which give acceptable results for preliminary calculations [12, 13]. In accordance with this method the value of allowable temperature variations of maximum temperatures in the block can be expressed as follows [12]:

where $K_{\text{м. перех}}$ is transition coefficient from the average temperature in the unit during heat evolution period to the maximum one; $[\Delta T_6^{\text{cp}}]$ — the allowable temperature variation of average temperatures in the block. The value of the coefficient $K_{\text{м. перех}}$ depends on the conditions of heat exchange of the block with the environment and is determined by the results of calculation of the temperature field (in our case $K_{\text{м. перех}} = 1.5$).

Permissible temperature difference of average temperatures in the block can be determined by the formula [12]

$$[\Delta T_6^{cp}] = \frac{\varepsilon_{np}}{\alpha K_{3. cp} K_{p. cp} K_{tp}}, \quad (8)$$

где ε_{np} — предельная растяжимость бетона; α — коэффициент линейного расширения бетона; $K_{3. cp}$ — коэффициент защемления (средний); $K_{p. cp}$ — коэффициент релаксации (средний); K_{tp} — коэффициент запаса на трещинообразование.

Предельная растяжимость бетона ε_{np} определяется лабораторными исследованиями при подборе состава бетона и зависит от его марки. Для бетона с маркой М250 принимаем $\varepsilon_{np} = 0,8 \cdot 10^{-4}$ [12].

Коэффициент линейного расширения α в зависимости от состава бетона изменяется в пределах $(0,75 \dots 0,1) \cdot 10^{-5}$. Для наших расчетов примем $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-5}$.

Коэффициент релаксации $K_{p. cp} = \varphi(\tau_0, \tau_k, \Delta t)$ учитывает ползучесть бетона [12]. Здесь τ_0 — возраст бетона в момент начала охлаждения бетонной кладки; τ_k — возраст бетона к моменту охлаждения бетонной кладки до температуры омоноличивания строительных швов; Δt — продолжительность охлаждения.

В зависимости от расположения блока бетонирования величина допустимого перепада температур может определяться следующим образом [12]:

для блоков в зоне «защемления» (расположенных вблизи основания) основной причиной трещинообразования является перепад между осредненной температурой в блоке в период экзотермии и осредненной температурой в блоке в период эксплуатации;

для блоков в «свободной» зоне — перепад между температурой в центре блока и температурой на его поверхности.

Определим значения допустимых температурных перепадов для принятых конкретных условий. При бетонировании блока в зимний период охлаж-

where ε_{np} is the limit compliance concrete; α — linear concrete expansion coefficient; $K_{3. cp}$ — crushing factor (average); $K_{p. cp}$ is relaxation factor (average); K_{tp} — factor of crack formation ignorance.

Ultimate concrete elongation is determined by laboratory tests in the selection of concrete composition, depending on the brand. For M250 brand concrete we assume $\varepsilon_{np} = 0,8 \cdot 10^{-4}$ [12].

The coefficient of linear expansion α depending on concrete composition varies between $(0.75 \dots 0.1) \cdot 10^{-5}$. For our calculations we take $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-5}$.

The relaxation coefficient $K_{p. cp} = \varphi(\tau_0, \tau_k, \Delta t)$ considers concrete creep [12]. Here τ_0 is a concrete age at the start of cooling concrete masonry; τ_k — concrete age by the time of cooling concrete masonry to the temperature of joint grouting of construction joints; Δt — time of cooling.

Depending on the block location, the value of permissible temperature variation can be determined as follows [12]:

for units in "crushing" area (located near the base), the main cause of cracking is the difference between the average temperature in the block during heat evolution period and the average temperature in the block during operation;

for blocks in the "free" zone — the difference between the temperature at the center of the block and the temperature on its surface.

We determine the values of permissible temperature variations adopted for specific conditions. During concreting block in winter cooling

дение начинается после периода экзотермического разогрева: $\tau_0 = 14$ дней; $\tau_k = 4$ месяца = 120 дней; $\Delta t = 106$ дней. По графику [12] для определения $K_{p,sp} = 0,4$.

При бетонировании блока в летний период охлаждение начинается после периода экзотермического разогрева: $\tau_0 = 180$ дней; $\tau_k = 10$ месяцев = 300 дней; $\Delta t = 120$ дней. По графику [12] для определения $K_{p,sp} = 0,8$.

Коэффициент «защемления» $K_{3,sp}$ — характеризует степень ограничения свободы деформаций из-за укладки его на жесткое основание (скалу, старый бетон). Как показывают исследования [12], этот коэффициент зависит от отношения высоты блока к его длине H_{bl}/l_{bl} и от отношения модулей деформации бетона и основания: $K_{3,sp} = \varphi(H_{bl}/l_{bl}, E_{бет}/E_{осн})$. Примем в наших расчетах:

$$E_{бет}/E_{осн} = 2,65 \cdot 10^5 / 2 \cdot 10^5 = 1,327.$$

По графикам в [12] находим $K_{3,sp} = 0,6$ (при высоте блока 3 м), $K_{3,sp} = 0,76$ (при высоте блока 1 м), $K_{3,sp} = 0,68$ (при высоте блока 2 м — расчет проверки адекватности).

После подстановки найденных значений в формулы (1), (2), получим значения допустимых перепадов температур для принятых конкретных условий. Для первого варианта (высота блока $H_{bl} = 3$ м): при бетонировании в осенне-зимний период $[\Delta T_6^{max}] = 50$ °C; при бетонировании в весенне-летний период $[\Delta T_6^{max}] = 25$ °C. Для второго варианта (высота блока $H_{bl} = 1$ м): при бетонировании в осенне-зимний период $[\Delta T_6^{max}] = 39,5$ °C; при бетонировании в весенне-летний период $[\Delta T_6^{max}] = 19,7$ °C. Для варианта в центре плана (расчет № 17 в табл.) (высота блока $H_{bl} = 2$ м): при бетонировании в осенне-зимний период $[\Delta T_6^{max}] = 43$ °C; при бетонировании в весенне-летний период $[\Delta T_6^{max}] = 21,5$ °C.

begins after exothermic heat period: $\tau_0 = 14$ days; $\tau_k = 4$ month = 120 days; $\Delta t = 106$ days. According to graph [12] to determine $K_{p,sp} = 0.4$.

When concreting of the block in summer cooling begins after a period of exothermic heat: $\tau_0 = 180$ days; $\tau_k = 10$ months = 300 days; $\Delta t = 120$ days. According to graph [12] to determine $K_{p,sp} = 0.8$.

"Crushing" coefficient $K_{3,sp}$ represents deformation restriction degree due to its laying on a rigid base (rock, old concrete). The researches show [12], that this coefficient depends on the ratio of the block height to its length H_{bl}/l_{bl} and on the ratio of concrete deformation module and base module $K_{3,sp} = \varphi(H_{bl}/l_{bl}, E_{бет}/E_{осн})$. In our calculations we take:

By graphs in [12] we find $K_{3,sp} = 0.6$ (at the block height of 3 m), $K_{3,sp} = 0.76$ (at the block height of 1 m), $K_{3,sp} = 0.68$ (at the block height of 2 m — adequacy test calculation).

After substituting the found values in formulas (1), (2), we obtain the values of permissible temperature variations adopted for specific conditions. For the first variant (block height $H_{bl} = 3$ m): during concreting in autumn-winter period $[\Delta T_6^{max}] = 50$ °C; during concreting in spring-summer period $[\Delta T_6^{max}] = 25$ °C. For the second variant (block height $H_{bl} = 1$ m): during concreting in autumn-winter period $[\Delta T_6^{max}] = 39.5$ °C; during concreting in spring-summer period $[\Delta T_6^{max}] = 19.7$ °C. For the variant in the centre of the plan (calculation № 17 in the table) (block height $H_{bl} = 2$ m): during concreting in autumn-winter period $[\Delta T_6^{max}] = 43$ °C; during concreting in spring-summer period $[\Delta T_6^{max}] = 21.5$ °C.

Полученные на основе численных решений температурной задачи перепады температур (см. табл.) сравнивались с допустимыми перепадами максимальных температур в блоке по условиям трещиностойкости. Значения, превышающие допустимые величины, выделены жирным шрифтом. Для определения перепада температур в зоне «защемления» средняя температура в блоке в период эксплуатации принята равной 3 °C (на основе температурных расчетов плотности в эксплуатационный период в [9]).

Анализ полученных результатов позволяет отметить следующее. При принятых условиях возведения в зоне «защемления» при бетонировании в теплое время года практически всегда велика вероятность температурного трещинообразования. В то же время при бетонировании прискальных блоков в холодное время температурные перепады превосходят допустимые значения только в случае использования высокотермичного бетона (расчеты № 10, 14, 16) или при укладке прогретой бетонной смеси и большом расходе цемента (расчет № 6).

Для зон, удаленных от основания также предпочтительно бетонирование в холодное время года (недопустимые перепады получены для расчетов № 6, 7, 10, 12—14). В летний период за счет выбора благоприятного состава и технологии укладки также можно достичь безопасного с точки зрения трещинообразования температурного режима бетонного массива.

Выводы. В результате анализа влияния различных факторов на температурный режим при возведении бетона получена математическая модель, позволяющая определить максимальную температуру внутри блока бетонного массива и перепад температур.

На основе полученной математической модели составлены номограммы,

The results obtained on the basis of numerical solutions of temperature problems, temperature variations (see table) were compared with the permissible variations of maximum temperatures in the block by crack resistance conditions. Values that are larger than permissible ones, are bold. To determine the temperature variation in "crushing" area, the average temperature in the block during operation is assumed equal to 3 °C (based on temperature calculations in the dam during the operating run [9]).

The analysis of the obtained results helps to note the following. Under accepted conditions of erection in "crushing" area during concreting in warm season there is nearly always the probability of thermal cracking. At the same time, during concreting of rock blocks in cold season, temperature variations exceed permissible values only in case of high temperature concrete (calculations № 10, 14, 16), or when laying heated concrete composition and large cement consumption (calculation № 6).

For areas remote from the foundation concreting in cold season is also preferable (unpermissible variations obtained for calculations № 6, 7, 10, 12—14). In summer due to the favorable choice of composition and technology of laying you can also reach safe concrete body temperature from the point of view of crack formation.

The conclusions. As a result of the analysis of influencing various factors on the temperature during concreting construction, we obtained mathematical model, allowing to determine the maximum temperature inside the concrete block body and temperature variations.

On the basis of the obtained mathematical models we composed no-

позволяющие решать как прямую задачу (определять максимальную температуру внутри бетонного массива при различных составах бетона, режимах его укладки), так и обратную (определять нужные составы и режимы для получения необходимой температуры).

При принятых конкретных условиях дана оценка возможного трещинообразования для рассмотренных составов бетона и режимов его укладки.

Библиографический список

1. Tatro S., Schrader E. Thermal Analysis for RCC — A Practical Approach // Roller Compacted Concrete III. New York : ASCE, 1992. Pp. 389—406.

2. Коган Е.А. Плотины из укатанного бетона : Анализ зарубежных данных о трещинообразовании и рекомендации по обеспечению термической трещиностойкости // Безопасность энергетических сооружений : науч.-тех. сб. М. : АО НИИЭС. 2000. Вып. 6. С. 157—183.

3. Гинзбург С.М., Рукавишников Т.Н., Шейнкер Н.Я. Имитационные модели для оценки температурного режима бетонной плотины на примере Бурейской ГЭС // Известия ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. 2002. Т. 241. С. 173—178.

4. Анискин Н.А., Нгуен Данг Жанг. Прогноз температурного режима бетонных гравитационных плотин из укатанного бетона // Гидротехническое строительство. 2007. № 12. С. 8—14.

5. Ballim Y. A numerical model and associated calorimeter for predicting temperature profiles in mass concrete // Cement & Concrete Composites. 2004. Vol. 26. No. 6. Pp. 695—703.

6. Wondwosen A., Girum U. Numerical prediction model for temperature distributions in concrete at early ages // American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. Vol. 7. No. 2. Pp. 255—265.

7. Tressa Kurian, Kavitha P.E., Bennet Kuriakose. Numerical analysis of temperature distribution across the cross

mograms, allowing to solve the direct problem (to determine the maximum temperature inside the concrete body at various concrete compositions and its installation modes) and backward (to identify the necessary structures and modes to obtain the required temperature).

Under assumed specific conditions we estimate possible crack forming for the considered concrete compositions and the modes of its shifting.

References

1. Tatro S., Schrader E. Thermal Analysis for RCC — A Practical Approach. Roller Compacted Concrete III. ASCE, New York, 1992, pp. 389—405.

2. Kogan E.A. Plotiny iz ukatannogo betona: Analiz zarubezhnykh dannykh o treshchinoobrazovanii i rekomendatsii po obespecheniyu termicheskoy treshchinostoykosti [Rolled Concrete Dams: The Analysis of Foreign Data on Crack Formation and Recommendations on Thermal Crack Resistance]. *Bezopasnost' energeticheskikh sooruzheniy: nauchno-tekhnicheskiiy sbornik* [Energetic Construction Safety: Scientific Technical Book of Reports]. Moscow, AO NIIES Publ., 2000, no. 6, pp. 157—183.

3. Ginzburg S.M., Rukavishnikova T.N., Sheynker N.Ya. Imitatsionnye modeli dlya otsenki temperaturnogo rezhima betonnoy plotiny na primere Bureyskoy GES [Simulation Models for Evaluating Thermal Behavior of Bureyskaya HPS Concrete Dam]. *Izvestiya VNIIG* [Proceedings of All-Russian Vedeneev Hydraulic Engineering Research Institute]. 2002, vol. 241, pp. 173—178.

4. Aniskin N.A., Nguen Dang Gang. Prognoz temperaturnogo rezhima betonnykh gravitatsionnykh plotin iz ukatannogo betona [Predicting Temperature Behavior of Rolled Concrete Gravity Dams]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Construction]. 2007, no. 12, pp. 8—14.

5. Ballim Y.A. Numerical Model and Associated Calorimeter for Predicting Temperature Profiles in Mass Concrete. *Cement & Concrete Composites*. 2004, vol. 26, no. 6, pp. 695—703. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00093-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00093-3).

section of a concrete dam during early ages // American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2013. Vol. 1. No. 2. Pp. 26—31.

8. Анишкин Н.А. Температурный режим гравитационных плотин из укатанного бетона // Гидротехническое строительство. 2005. № 12. С. 13—17.

9. Анишкин Н.А., Нгуен Хоанг. Температурный режим бетонной массивной плотины с воздушной полостью в суровых климатических условиях // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 212—218.

10. Запорожец И.Д., Окорочков С.Д., Парийский А.А. Тепловыделение бетона. М.: Стройиздат, 1966. 314 с.

11. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 278 с.

12. Телешев В.И. Основы и методы проектирования и возведения бетонных плотин в особо суровых климатических условиях: дисс. ... д-ра техн. наук. СПб.: СПбГПУ, 2003. 217 с.

13. Руководство по проектированию бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений. М.: Стройиздат, 1983. 513 с.

14. Хованский Г.С. Основы номографии. М.: Наука, 1976. 350 с.

15. Klemczak B., Knoppik-Wrobel A. Early age thermal and shrinkage cracks in concrete structures-description of the problem // Architecture civil engineering environment. 2011. Vol. 4. No. 2. Pp. 35—48.

16. Ansell A., Malm R. Modelling of thermally induced cracking of a concrete buttress dam // Nordic Concrete Research. 2008. Vol. 38. No. 2. Pp. 69—88.

Поступила в редакцию в июне 2014 г.

Об авторах: **Анишкин Николай Алексеевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидротехнических сооружений, директор института гидротехнического и энергетического строитель-

6. Wondwosen A., Girum U. Numerical Prediction Model for Temperature Distribution in Concrete at Early Ages. American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014, vol. 7, no. 2, pp. 255—265.

7. Tressa Kurian, Kavitha P.E., Bennet Kuriakose. Numerical Analysis of Temperature Distribution Across the Cross Section of a Concrete Dam During Early Ages. American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2013, vol. 1, no. 2, pp. 26—31.

8. Aniskin N.A. Temperaturnyy rezhim gravitatsionnykh plotin iz ukatannogo betona [Temperature Behavior of Gravity Rolled Concrete Dam]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Construction]. 2005, no. 12, pp. 13—17.

9. Aniskin N.A., Nguen Hoang. Temperaturnyy rezhim betonnoy massivnoy plotiny s vozduшноy polost'yu v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh [Temperature Behavior of Air Spaced Concrete Solid Dam in Severe Climatic Conditions]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012, no. 12, pp. 212—218.

10. Zaporozhets I.D., Okorokov S.D. Pariyskiy A.A. *Teplovydelenie betona* [Heat Emission of Concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1966, pp. 99—103.

11. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Ju.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Experimental Planning in the Process of Optimal Conditions Search]. Moscow, Nauka Publ., 1976, pp. 70—92.

12. Teleshev V.I. *Osnovy i metody proektirovaniya i vozvedeniya betonnykh plotin v osobo surovyykh klimaticheskikh usloviyakh: dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk* [Foundations and Methods of Concrete Dam Design and Construction in Severe Climatic Conditions. Doctoral Thesis]. 2003, St. Petersburg, SpbGPU Publ., 217 p.

13. *Rukovodstvo po proektirovaniyu betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsey gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Practice of Reinforced Concrete Structural Design of Hydraulic Constructions]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983, 513 pp.

14. Khovanskiy G.S. *Osnovy nomografii* [Nomography Basics]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 350 p.

15. Klemczak B., Knoppik-Wrobel A. Early Age Thermal and Shrinkage Cracks in Concrete Structures — Description of the Problem.

ства, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, nikolai_aniskin@mail.ru;

Нгуен Хоанг — аспирант кафедры гидротехнических сооружений, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, hoangmisi1984@mail.ru.

Для цитирования: *Анискин Н.А., Нгуен Хоанг. Прогноз трещинообразования бетонных массивных плотин при возведении в суровых климатических условиях // Вестник МГСУ. 2014. № 8. С. 165—178.*

Architecture Civil Engineering Environment. 2011, no. 2, pp. 35—48.

16. Ansell A., Malm R. Modelling of Thermally Induced Cracking of a Concrete Buttress Dam. *Nordic Concrete Research*. 2008, vol. 38, no. 2, pp. 69—88.

About the authors: **Aniskin Nikolay Alekseevich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chair, Department of Hydraulic Engineering Structures, Director, Institute of Hydraulic and Energy Sector Construction, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; nikolai_aniskin@mail.ru;

Nguen Hoang — Postgraduate Student, Department of Hydraulic Engineering Structures, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; hoangmisi1984@mail.ru.

For citation: Aniskin N.A., Nguen Hoang. Prognoz treshchinoobrazovaniya betonnykh massivnykh plotin pri vozvedenii v surovykh klimaticheskikh usloviyakh [Predicting Crack Formation in Solid Concrete Dams in Severe Climatic Conditions during Construction Period]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 8, pp. 165—178.