

Использование поверхностной теплоизоляции для регулирования температурного режима бетонного массива при его возведении

Анискин Н. А., доктор техн. наук, профессор,
Нгуен Чонг Чык¹, аспирант, Фан Хань Хань, магистрант (НИУ МГСУ)

При возведении бетонных массивов в результате экзотермии цемента может возникнуть значительный температурный перепад между центральной зоной и поверхностью конструкции. Это приводит к возникновению растягивающих напряжений и появлению температурных трещин. Одно из технологических мероприятий для исключения этого отрицательного эффекта — использование поверхностной теплоизоляции. Она может использоваться как в зимний период (для предотвращения чрезмерного охлаждения поверхности бетона), так и летом (для снижения нагрева поверхности). В данной работе с помощью численного метода конечных элементов дана оценка воздействия на температурный режим возводимого бетонного массива поверхностной теплоизоляции верхней горизонтальной поверхности блока различного типа и толщины. Предложена методика выбора необходимой для определенных условий возведения толщины теплоизоляции в виде слоя пенополистирола или песка. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании и строительстве крупных бетонных блоков.

Ключевые слова: температурный режим, термонапряженное состояние, бетонный массив, температурное трещинообразование, поверхностная теплоизоляция.

The use of surface thermal insulation to regulate the temperature regime of a mass concrete during construction

Aniskin N. A., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Nguyen Trong Chuc¹, PhD student, Phan Khanh Khanh, master student (National
Research Moscow State University of Civil Engineering)

As a result of cement exothermic when building mass concrete, a significant temperature difference between the central zone and surface can occur. This leads to the formation of tensile stresses and thermal cracks. One of the technological measures to eliminate this negative effect is the use of surface thermal insulation. It can be used both for winter (to prevent excessive cooling of the concrete surface) and for summer (to reduce surface heating). In this paper using numerical methods and evaluation is given to consider the effect of horizontal surface thermal insulation and its thickness on the temperature regime of mass concrete. A technique is proposed in order to choose the thickness of surface thermal insulation (the polystyrene foam or sand layer) necessary under certain construction conditions. The research results can be used in the design and construction of mass concrete blocks.

Keywords: temperature regime, thermal stress state, mass concrete, thermal cracking, surface thermal insulation.

Применение поверхностной теплоизоляции является простым, относительно экономичным и эффективным мероприятием по регулированию температурного режима возводимых бетонных массивных плотин [1 – 3]. Она может использоваться как в зимний период возведения, так и летом. В процессе зимнего бетонирования теплоизоляционное покрытие позволяет повысить температуру на поверхности сооружения и снизить температурный перепад между центром массива и его поверхностями [4]. В летний период, наоборот, использование теплоизоляции позволяет предотвратить чрезмерный нагрев

поверхности [5]. Защита бетонных поверхностей от внешнего температурного воздействия необходима при длительных перерывах в бетонировании для консервации бетонных блоков.

Как известно, большая величина температурного перепада между центром и поверхностями бетонного массива может вызвать появление температурных трещин, нарушающих монолитность сооружения [6]. Применение поверхностной теплоизоляции позволяет замедлить охлаждение поверхностей и снизить разницу температуры между ними и нагретым в результате экзотермии цемента центром бетонного блока [7]. При применении этого мероприятия важно выбрать тип и материал теплоизоляции, ее толщину. Также необходимо выдерживать

¹ ntchuc.mta198@gmail.com

бетонную конструкцию под теплоизоляцией определенное время. Преждевременное удаление теплоизоляции может вызвать растрескивание поверхности сооружения [8]. Вместе с тем использование теплоизоляции задерживает отвод тепла и увеличивает время охлаждения конструкции, что может снизить положительный экономический эффект от ее применения [9].

Решение задачи по оптимизации параметров теплоизоляции в процессе возведения бетонного массива и времени ее использования является достаточно сложной задачей ввиду необходимости учета многих действующих факторов. Кроме того, от времени и температуры бетона зависят его тепловыделение, упругость и прочностные свойства. Вопросам влияния теплоизоляции бетонных конструкций на их температурный режим и термонапряженное состояние посвящено много исследований как российских, так зарубежных ученых [10 – 12].

Существует много типов изоляционных материалов, используемых при производстве бетонных работ. Некоторые из них показаны на рис. 1, а. Актуальной задачей сегодня при использовании теплоизоляции является оптимизация ее конструкции и параметров исходя из требований к температурному режиму, максимальной скорости охлаждения массива и времени использования [13 – 15].

Целью настоящей работы является расчетная оптимизация теплоизоляции горизонтальной поверхности массивного бетонного блока при различных температурных условиях. Рассматривалось два варианта используемого теплоизоляционного материала: теплоизоляция в виде слоя песка и полистирольная плита. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса “Midas Civil” на основе численного метода конечных элементов [16, 17].

Предмет исследования. В этом исследовании используется трехмерная конечноэлементная модель массивного бетонного блока размером $10 \times 10 \times 3$ м, который лежит на области основания размером $15 \times 15 \times 3$ м. Схема исследуемой конструкции приведена на рис. 1, б. Используется теплоизоляция верхней горизонтальной поверхности (пенополистирол, слой песка) в сочетании с комбинированной опалубкой боковых поверхностей блока. Физические характеристики материалов, использованные в расчетах, представлены в табл. 1.

Температура окружающей среды существенно влияет на максимальную температуру в центре бетонного блока в процессе твердения. Рассмотрены климатические условия строительства, характерные для северного Вьетнама. Рассмотрены варианты укладки бетона при температуре воздуха $26,5^\circ\text{C}$ (летний период), 17°C (зимний период), 5°C (условия горных районов северного Вьетнама).

Математические основы численного моделирования при решении температурной задачи. Численное моделирование температурной нестационарной задачи с учетом тепловыделения при гидратации цемента основывается на решении известного уравнения теории теплопроводности [10, 11]

$$k\nabla^2 T + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где T — температурная функция, $^\circ\text{C}$; k — теплопроводность материала, $\text{м}^2/\text{с}$; c — удельная теплоемкость материала, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$; ρ — плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; Q — теплота, выделяемая в процессе гидратации, $\text{кДж}/\text{м}^3$ (определяется как $C \cdot \mathcal{E}$, где C — расход цемента на кубометр бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$; \mathcal{E} — максимальное тепловыделение цемента, $\text{кДж}/\text{кг}$); τ — время, сут.

Уравнение (1) можно записать как

$$\frac{k}{c\rho} \nabla^2 T + \frac{Q}{c\rho} = \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2)$$

Величина теплоты, выделяемой в процессе гидратации, определяется как

$$Q = C \cdot \mathcal{E}, \quad (3)$$

где C — расход цемента на кубометр бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$; \mathcal{E} — максимальное тепловыделение цемента, $\text{кДж}/\text{кг}$.

Граничное условие для случая конвективного теплообмена на поверхности бетонного блока может быть записано в виде [10 – 12]

$$q = h_{\text{эк}}(T_s - T_a), \quad (4)$$

где q — тепловой поток на единицу площади, $\text{Вт}/\text{м}^2$; T_s и T_a — температура на поверхности блока и окружающего воздуха соответственно, $^\circ\text{C}$; $h_{\text{эк}}$ — эквивалентный коэффициент теплоотдачи (учитывает наличие опалубки на боковых поверхностях блока и поверхностной теплоизоляции на его горизонтальной поверхности, зависит от их конструкции и материалов) $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Эквивалентный коэффициент теплообмена с учетом вида и конструкции опалубки или поверхностной теплоизоляции определялся по формуле [18]

$$h_{\text{эк}} = \left(\frac{1}{hA} + \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{k_i A} \right)^{-1}, \quad (5)$$

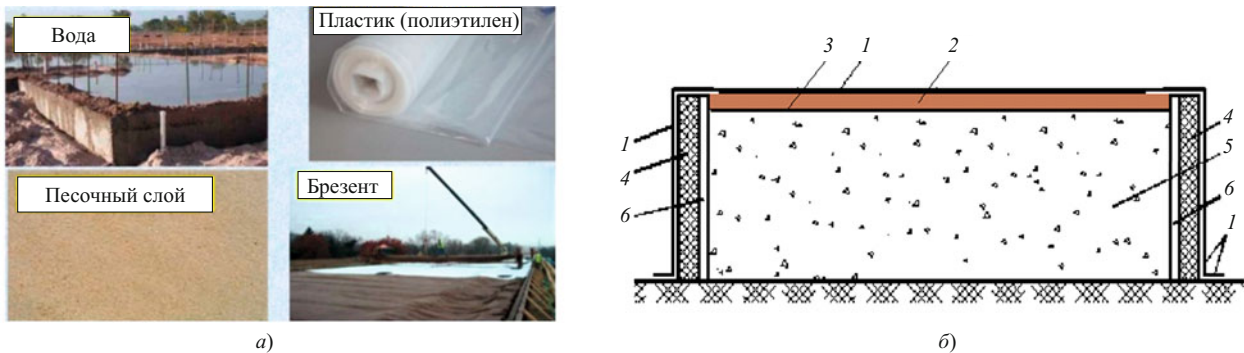


Рис. 1. Использование поверхностной теплоизоляции при производстве бетонных работ: *a* — некоторые виды поверхностной теплоизоляции; *б* — схема исследованного бетонного блока; 1, 3 — полиэтиленовое покрытие; 2 — поверхностная изоляция (пенополистирол, слой песка); 4 — пенополистерол толщиной 3 см; 5 — бетон; 6 — деревянная опалубка толщиной 2,5 см

где h — коэффициент теплообмена между бетонной поверхностью и окружающей средой ($9,9 - 17,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$); A — отношение площади поверхностной конструкции i -го вида, приходящейся на 1 м^2 поверхности бетонного блока (в нашем случае $A = 1$); L_i — толщина i -го слоя поверхностной конструкции (толщина элементов боковой опалубки или поверхностной теплоизоляции); k_i — коэффициент теплопроводности для i -го слоя опалубки или теплоизоляции.

Решение температурной задачи для возводимого бетонного блока с теплоизоляцией поверхностей блока сводится к решению основного дифференциального уравнения теории теплопроводности с внутренними источниками тепла (2). В качестве граничного условия на границе сооружения рассматривалось граничное условие 3-го рода (конвективный теплообмен). Учет опалубки и теплоизоляции при этом производился за счет введения экви-

валентных коэффициентов теплоотдачи, определенных для боковой опалубки и теплоизоляции по зависимости (5).

Результаты и обсуждение

Температурный режим и термонапряженное состояние бетонного блока при использовании поверхностной теплоизоляции из полистирола. С помощью программного комплекса “Midas Civil” были проведены расчеты температурного режима возведенного бетонного блока (рис. 1, б) для варианта при отсутствии теплоизоляционного покрытия его верхней поверхности и для вариантов ее теплоизоляции полистиролом разной толщины. Рассматривались толщины теплоизоляционного материала 1, 2 и 3 см. Во всех случаях моделировалась комбинированная опалубка с теплоизоляцией боковых поверхностей (рис. 1, б). Такая конструкция с точки зрения температурного режима равноценна бе-

Т а б л и ц а 1

Расчётные физические характеристики материалов

Характеристики	Значения			
	бетон	основание	пенополистирол	песок
Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$	2,60	2,00	0,029	0,27
Удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$	0,95	0,84	1,13	0,84
Плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$	2400	2650	20	1602
Коэффициент конвективной теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	12,00	14,00	hэк	hэк
Модуль упругости, $\text{Н}/\text{м}^2$	$2,7 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{10}$	$3,0 \cdot 10^9$	$5,0 \cdot 10^7$
Коэффициент линейного расширения	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,18	0,2	0,2	0,3
Расхода цемента, $\text{кг}/\text{м}^3$	450	-	-	-
Максимальное тепловыделение цемента, $\text{кДж}/\text{кг}$	350	-	-	-

Эквивалентные коэффициенты теплоотдачи на границе бетона и воздуха при использовании полистирольной изоляции

Толщина полистирола, см	0	1	2	3
Эквивалентный коэффициент теплопередачи $h_{эк}$, Вт/(м ² · °С)	12,00	2,33	1,29	0,89

тонному блоку с гораздо большими плановыми значениями, чем рассматриваемые 10 × 10 м. Влияние теплообмена с воздухом через боковые поверхности на центральную зону блока, включая поверхность, минимально. На основании уравнения (5) определялся эквивалентный коэффициент теплоотдачи по границе бетонной горизонтальной поверхности с воздухом, значения которого представлены в табл. 2.

Результаты температурных расчетов в виде значений максимальных температур, возникающих в центральной зоне бетонного блока, и перепадов температуры между центром и поверхностью блока для различных толщин теплоизоляции даны в табл. 3.

На основе полученных результатов можно отметить следующее. Во всех рассмотренных случаях максимальная температура бетона в его центральной зоне значительна и изменяется в интервале от 83,15 до 86,54 °С в зависимости от толщины поверхностной теплоизоляции и температуры воздуха. Величины перепада температуры в значитель-

ной степени отличаются в зависимости от толщины теплоизоляции. При отсутствии поверхностной теплоизоляции перепады меняются от 43,5 °С при бетонировании в летний период до 50,16 °С при бетонировании зимой. Еще большая величина возникает в условиях горного региона — 58,67 °С. Эта значительная разница температуры между центром блока и его верхней поверхностью вызвана поверхностным теплообменом с воздухом.

При увеличении толщины полистирола максимальная температура в центре бетонного блока увеличивается, поскольку полистирольный слой уменьшает процесс конвекционного теплообмена от поверхности бетона к окружающей среде. Повышение температуры внутри бетонного блока незначительно. Кроме того, температура окружающей среды не оказывает существенного влияния на максимальное значение температуры в бетонном блоке (из-за полистирольной изоляции, защищающей поверхность бетонного блока).

Использование поверхностной теплоизоляции из полистирола значительно уменьшает величину перепада (табл. 3). Для условий горного Вьетнама

Т а б л и ц а 3

Максимальная температура и перепад температуры в бетонном блоке с утеплителем из полистирола

Температура воздуха, °С	Максимальная температура, °С	Толщины изоляции из полистирола, см			
	Перепад температуры	0	1	2	3
26,5	T_{\max}	84,68	86,07	86,36	86,54
	ΔT	43,50	19,67	11,57	7,69
17	T_{\max}	83,97	85,57	85,96	86,14
	ΔT	50,16	22,84	13,54	9,07
5	T_{\max}	83,15	85,05	85,55	85,77
	ΔT	58,67	27,05	16,21	10,98

Т а б л и ц а 4

Эквивалентный коэффициент теплообмена на границе бетона с воздухом при использовании изоляции из песчаного слоя

Толщина песка, см	0	2	4	6	8	10	12
$h_{эк}$, Вт/(м ² · °С)	12,00	6,35	4,32	3,27	2,63	2,20	1,89

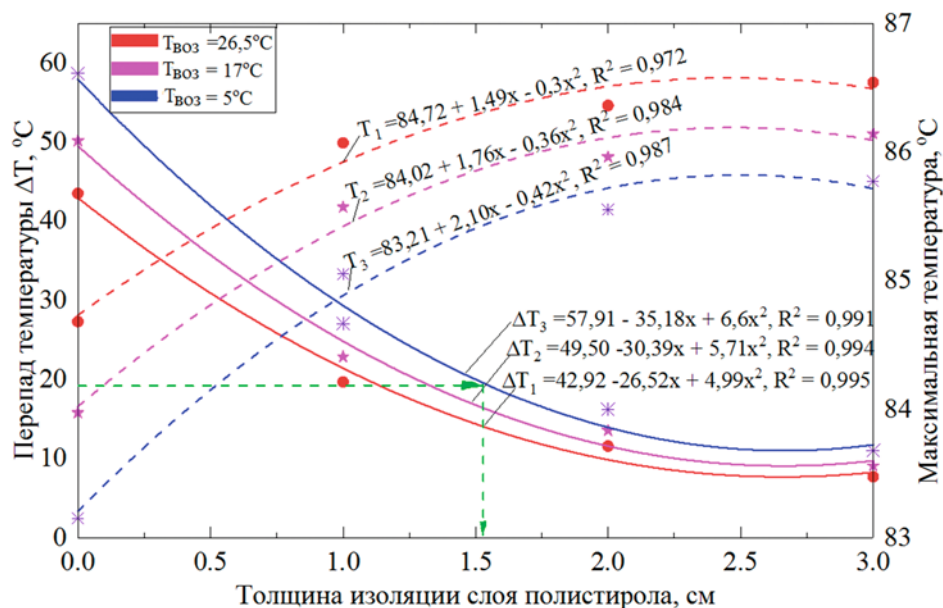


Рис. 2. Влияние толщины изоляции из полистирола на максимальную температуру и температурный перепад бетонного блока

перепад равен 27,05 °C при толщине полистирола 1 см и 10,98 °C при толщине 3 см.

На основе программы Matlab были получены функции зависимости максимальной температуры и перепада температуры от толщины полистирола. В зависимости от температуры окружающей среды функции максимальной температуры выглядят следующим образом:

$$T_{\text{воз}} = 26,5 \text{ °C}: T_1 = 84,72 + 1,49x - 0,3x^2 \text{ с}$$

точностью $R^2 = 0,972$;

$$T_{\text{воз}} = 17,0 \text{ °C}: T_2 = 84,02 + 1,76x - 0,36x^2 \text{ с}$$

точностью $R^2 = 0,984$;

$$T_{\text{воз}} = 5,0 \text{ °C}: T_3 = 83,21 + 2,10x - 0,42x^2 \text{ с}$$

точностью $R^2 = 0,987$,

где x — толщина теплоизоляции, см.

Функции зависимости перепада температур от толщины полистирола (для температуры воздуха $T_{\text{воз}} = 26,5; 17$ и 5 °C) получены в виде

$$T_{\text{воз}} = 26,5 \text{ °C}: \Delta T_1 = 42,92 - 26,52x + 4,99x^2 \text{ с}$$

точностью $R^2 = 0,995$;

$$T_{\text{воз}} = 17,0 \text{ °C}: \Delta T_2 = 49,50 - 30,39x + 5,71x^2 \text{ с}$$

точностью $R^2 = 0,994$;

$$T_{\text{воз}} = 5,0 \text{ °C}: \Delta T_3 = 57,91 - 35,18x + 6,60x^2 \text{ с}$$

точностью $R^2 = 0,991$.

Представленное для каждой зависимости значение R^2 (коэффициент детерминации) имеет достаточно близкое значение к 1, что говорит о высокой степени соответствия полученных функций значениям величин T и ΔT из численных экспериментов. Вычисление коэффициента производилось по известной формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - Y_i')^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}$$

где Y_i — значение функции (T или ΔT) в i -той точке, полученное из численного эксперимента; Y_i' — значение функции в i -той точке, полученное по предлагаемой функции; \bar{Y} — среднее значение функции Y_i .

Влияние толщины изоляции из полистирола на величины максимальной температуры и температурные перепады бетонного блока в виде графиков функций представлено на рис. 2.

Чтобы предотвратить риск растрескивания, перепады температур между центром и поверхностью блока не должны превышать 20 °C [19, 20]. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. При расходе цемента $C = 450 \text{ кг/м}^3$ на 1 м^3 бетона и его полном тепловыделении $\mathcal{E}_{\text{макс}} = 350 \text{ кДж/кг}$ минимальная толщина поверхностной полистирольной изоляции, обеспечивающая допустимый температурный перепад и отсутствие трещинообразования для любого из рассмотренных климатических условий, должна быть не меньше 1,5 см.

Температурные трещины в бетонном блоке возникают в случае превышения допустимых растяжи-

вающих деформаций или напряжений. Чтобы оценить влияние теплоизоляции, было рассчитано термонапряженное состояние бетонного блока для варианта с температурой воздуха 5 °С (наихудший с точки зрения максимального температурного перепада вариант). На рис. 3 показана модель метода конечных элементов расчетной области (с учетом симметрии показана 1/4 часть общей модели) с узлами, в которых далее представлены изменения максимальных растягивающих напряжений. Выбраны характерные узлы: узел 1 — в центре на горизонтальной поверхности блока; узел 2 — в центре бетонного блока; узел 3 — на боковой поверхности бетонного блока по середине его высоты. Были проведены расчеты для варианта без поверхностной теплоизоляции и с теплоизоляцией из полистирола толщиной 1,5 см, что по проведенной выше оценке температурного режима обеспечивает допустимый перепад температуры между центром блока и его поверхностью в 20 °С. Напряжения определялись от действия температуры и собственного веса конструкции.

На рис. 4 показаны результаты расчетов в виде графиков изменения максимальных растягивающих напряжений в отмеченных точках во времени. Также дана кривая роста допустимого растягивающего напряжения бетона.

Анализируя полученные результаты, можно констатировать, что в случае отсутствия поверхностной теплоизоляции (рис. 4, а) растягивающее напряжение в узле 1 (на поверхности блока) достигает максимального значения 2,95 МПа через 108 ч после укладки бетона. Интервал по времени, когда поверхностное напряжение превышает допустимое напряжение — от 48 до 120 ч после укладки бетона. В это время на поверхности бетонного блока

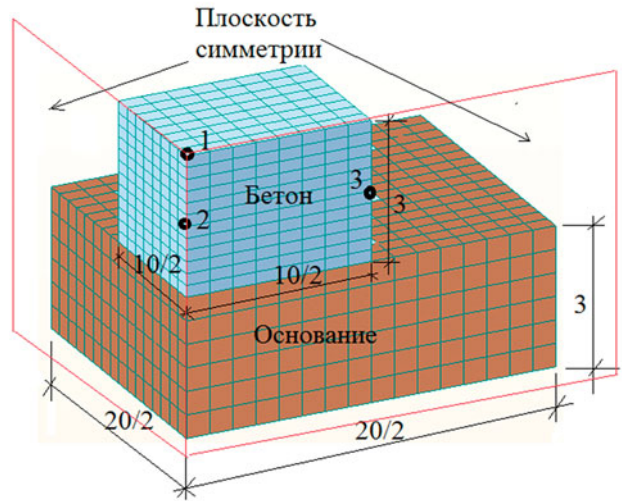


Рис. 3. Расчетная модель МКЭ

большая вероятность образования температурных трещин (рис. 4, а).

При использовании полистирольной теплоизоляции толщиной 1,5 см напряжения в рассмотренных точках бетонного блока уменьшились по сравнению с вариантом отсутствия поверхностной теплоизоляции. Максимальное значение растягивающего напряжения в точке составляет 2,65 МПа после 108 ч укладки бетона и уменьшается со временем. Это значение не превышает допустимое значение напряжения для возраста бетона 108 ч — 2,70 МПа. Трещинообразование в этом случае маловероятно, что подтверждает выводы, сделанные на основе решения температурной задачи (рис. 2).

Применение теплоизоляции из слоя песка для регулирования температурного режима бетонного блока. В качестве теплоизоляции можно использовать такой часто доступный на строительных площадках материал как песок. Для сравнения с вариантом полистирола были рассмотрены вари-

Т а б л и ц а 5

Максимальная температура в массе бетона с утеплителем из песчаного слоя

Температура воздуха, °С	Максимальная температура, °С	Толщины изоляции из песчаного слоя, см						
		Перепад температуры	0	2	4	6	8	10
26,5	$T_{\text{мак}}$	84,68	85,25	85,60	85,83	85,98	86,09	86,18
	ΔT	43,50	33,30	27,43	22,98	19,60	16,88	14,63
17	$T_{\text{мак}}$	83,97	84,59	84,98	85,27	85,46	85,61	85,73
	ΔT	50,16	37,75	31,05	25,94	22,08	18,94	16,36
5	$T_{\text{мак}}$	83,15	83,96	84,40	84,68	84,91	85,10	85,25
	ΔT	58,67	43,85	36,07	30,13	25,65	20,15	19,01

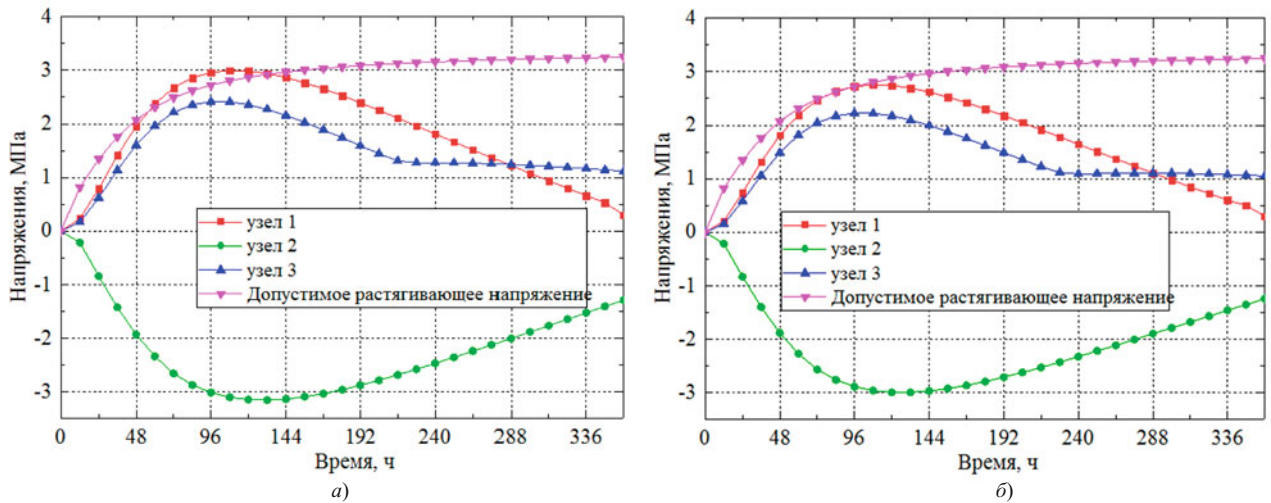


Рис. 4. Графики изменения максимальных температурных напряжений во времени:

а — при отсутствии поверхностной теплоизоляции;

б — с использованием поверхностной теплоизоляции полистиролом толщиной 1,5 см)

анты теплоизоляции из песка с толщинами слоев от 0 до 12 см. На основании уравнения (5) определялся эквивалентный коэффициент теплообмена на границе бетонной поверхности с воздухом. Полученные значения представлены в табл. 4.

С помощью метода конечных элементов были определены значения максимальной температура и разность температур между центром и поверхностью бетонного блока. Полученные величины приведены в табл. 5.

В табл. 5 показано, что качество бетона улучшается по мере увеличения толщины изоляции. При увеличении толщины изоляции из песка слоем от 0 до 12 см перепады температур снижаются.

На основе программы Matlab были получены функции зависимости максимальной температуры и перепада температуры от толщины слоя песка. В зависимости от температуры окружающей среды

функции максимальной температуры выглядят следующим образом:

$$T_{\text{воз}} = 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}: T_1 = 84,73 + 0,25x - 0,01x^2 \text{ с точностью } R^2 = 0,992;$$

$$T_{\text{воз}} = 17,0 \text{ } ^\circ\text{C}: T_2 = 84,02 + 0,28x - 0,01x^2 \text{ с точностью } R^2 = 0,991;$$

$$T_{\text{воз}} = 5,0 \text{ } ^\circ\text{C}: T_3 = 83,24 + 0,33x - 0,01x^2 \text{ с точностью } R^2 = 0,984,$$

где x — толщина теплоизоляции, см.

Функции зависимости перепада температур от толщины слоя песка получены в виде

$$T_{\text{воз}} = 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}: \Delta T_1 = 42,54 - 4,33x + 0,17x^2 \text{ с точностью } R^2 = 0,996;$$

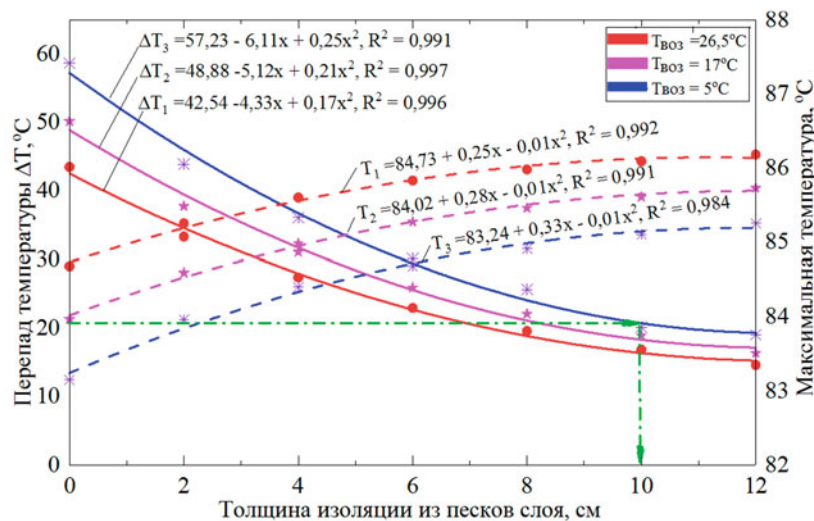


Рис. 5. Влияние толщины изоляции из песка на максимальную температуру и температурный перепад бетонного блока

$T_{\text{воз}} = 17,0 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta T_2 = 48,88 - 5,12x + 0,21x^2$ с
точностью $R^2 = 0,997$;

$T_{\text{воз}} = 5,0 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta T_3 = 57,23 - 6,11x + 0,25x^2$ с
точностью $R^2 = 0,991$.

Влияние толщины изоляции из песчаного слоя на максимальную температуру в блоке и температурные перепады представлены в виде графиков на рис. 5.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что эффект использования песка в качестве теплоизоляции аналогичен варианту с полистиролом. Для предотвращения образования трещин при рассмотренных условиях строительства (расход цемента, его тепловыделение) и вариантах температуры окружающей среды) необходимая толщина песка, обеспечивающая допустимый перепад температуры $20 \text{ }^\circ\text{C}$, составляет 10 см.

Сравнивая два рассмотренных типа теплоизоляции, можно отметить возможную доступность и низкую стоимость варианта из песка, особенно при наличии этого материала у места строительства. Вместе с тем использование песка для изоляции поверхностей имеет несколько недостатков:

сложность удаления песка после окончания использования;

резкое ухудшение теплоизоляционных свойств при намокании (например, после дождя);

сложность использования на наклонных поверхностях.

Выводы

1. Использование поверхностной теплоизоляции позволяет эффективно регулировать температурный режим возводимого бетонного блока в части уменьшения температурного перепада между центром блока и его верхней поверхностью. Это позволяет исключить возможность температурного трещинообразования.

2. Получены оптимальные толщины теплоизоляционных слоев для рассмотренных условий возведения.

3. Использование полистирольной изоляции более эффективно с точки зрения технологичности, чем использование изоляции в виде слоя песка. Толщина полистирольной изоляции, превышающая 1,5 см, обеспечит отсутствие температурного трещинообразования применительно к климатическим условиям северного Вьетнама.

Список литературы

1. *Elemuo Peter Onyekachukwu, Puneet Sharma, Jagdeep Singh.* Review work on plastic formwork // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017. Vol. 8(7). Pp. 1441 – 1146.
2. *Анискин Н. А., Чык Н. Ч.* Проблема температурного трещинообразования в бетонных гравитационных плотинах // Вестник МГСУ. 2020. № 15(3). С. 380 – 398.
3. *Chuc N. T., Thoan P. V., Kiet B. A.* The effects of insulation thickness on temperature field and evaluating cracking in the mass concrete // Electronic Journal of Structural Engineering. 2018. Vol. 18(2). Pp. 128 – 132.
4. *Крылов Б. А.* Некоторые вопросы технологии производства работ при применении бетона в холодное время // Технологии бетонов. 2012. № 1. С. 33 – 35.
5. *Семенов К. В., Барабанищikov Ю. Г.* Термическая трещиностойкость массивных бетонных фундаментных плит и ее обеспечение в строительный период зимой // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 2 (17). С. 125 – 135.
6. *Анискин Н. А., Чык Н. Ч., Брянский И. А., Хынг Д. Х.* Определение температурного поля и термонапряженного состояния укладываемого бетонного массива методом конечных элементов // Вестник МГСУ. 2018. № 13. С. 1407 – 1418.
7. *Yuan-Yuan Chen, Ssu-Yu Chen, Chien-Jou Yang, Hei-Tao Chen.* Effects of insulation materials on mass concrete with Pozzolans // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 137. Pp. 261 – 271.
8. *ACI Committee 301-10.* Specification for structure Concrete // American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010.
9. *СП 41.13330.2012.* Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. 2012. — 72 с.
10. *Крам Т. Ю., Рукавишников Т. Н.* Оценка температурного режима и термонапряженного состояния блоков водослива при различных условиях бетонирования // Известия ВНИИГ. 2007. Т. 248. С. 77 – 85.
11. *Zhu Bofang.* Thermal stresses and temperature control of mass concrete // Published by Elsevier Inc. All rights reserved. 2014. — 487p.
12. *Zhang X., Li S., Li Y., Ge Y., Li H.* Effect of superficial insulation on roller-compacted concrete dams in cold regions // Advances in Engineering Software. 2018. Vol. 42 (11). Pp. 939 – 943.
13. *Steve Whittier, Jim Olyniec, Robert Mcglohn.* Minimizing temperature differentials in mass concrete // Concrete internationa. 2004. — 4 p.
14. *ACI 207.4R-93.* Cooling and insulating systems for mass concrete // American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1993. — 22 p.
15. *Nguyen T. C., Luu X. B.* Reducing temperature difference in mass concrete by surface insulation // Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 4 (88). Pp. 70 – 79.
16. *Ki K. K., Gwan E. I., Gug K. M.* Adiabatic temperature rise and reaction rate of mass structure in Lotte Center Hanoi project // Journal of Science and Technology Building. 2012.
17. *Jiancheng Sun, Yajing Pang, Wenzhong Zhao.* FEM analysis of massive concrete pile using of cooling pipe in shahe bridge // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vols. 501 – 504. Pp. 1359 – 1363.
18. *Xian Liu, Yong Yuan, Quanke Su.* Sensitivity analysis of the early-age cracking risk in an immersed tunnel // Structural Concrete. 2014. Vol. 15(2). Pp. 179 – 190.
19. *Se-Jin J.* Advanced assessment of cracking due to heat of hydration and internal restraint // ACI Materials Journal. 2008. Vol. 105. Pp. 325 – 333.
20. *Soo Geun Kim.* Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement // Graduate Theses and Dissertations. 2010. — 126 p.