

УДК 625.841

Напряжения в цементно-бетонном покрытии от термического удара

Канд. техн. наук М. К. Пшембаев¹⁾, докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев¹⁾,
канд. техн. наук, доц. Л. И. Шевчук¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Среди различных воздействий на покрытие автомобильных дорог следует выделить так называемый термический удар. В зимний период эксплуатации дорожных покрытий на поверхности бетона образуется слой льда. Обычно для его удаления с поверхности дорожного покрытия применяется хлористый натрий, который понижает температуру замерзания воды и вызывает таяние льда при отрицательной температуре. Поэтому в бетоне, находящемся непосредственно под тающим слоем льда, резко снижается температура, что приводит к значительным напряжениям. Такое явление получило название термического удара (локальное значительное изменение температуры). Этот процесс недостаточно изучен, имеет практическую значимость для оценки прочности и долговечности цементно-бетонного покрытия и поэтому актуален. Целью исследований авторов являлись разработка математической модели и определение допустимых градиентов термического удара для цементно-бетонного дорожного покрытия. Для нахождения напряженно-деформированного состояния цементно-бетонных покрытий автомобильных дорог использовали конечно-разностный метод. Составлена компьютерная программа, позволяющая выполнять расчет дорожного покрытия при различных законах распределения температуры по его глубине. Получены закономерности распространения деформаций и напряжений в цементно-бетонном покрытии автомобильных дорог при термическом ударе. Установлен допустимый параметр распределения температур по толщине покрытия. При расчете использован критерий прочности, основанный на процессе образования и развития микротрещин в бетоне. Выявлено, что термический удар вызывает на поверхности цементно-бетонного покрытия значительные градиенты температур, приводящие к большим нормальным напряжениям в поверхностном слое бетона. Возможность появления микротрещин в дорожном покрытии определяется характеристиками прочности материала, условиями закрепления плиты и градиентом температур.

Ключевые слова: температура, градиент, напряжения, прочность, бетон, критерий, покрытие, автомобильная дорога, конечные разности, обледенение, граница, сплошность, микротрещины

Для цитирования: Пшембаев, М. К. Напряжения в цементно-бетонном покрытии от термического удара / М. К. Пшембаев, Я. Н. Ковалев, Л. И. Шевчук // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 2. С. 87–94

Stresses in Cement-Concrete Pavement Surfacing Caused by Thermal Shock

М. К. Pshembaev¹⁾, Ya. N. Kovalev¹⁾, L. I. Shevchuk¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. It is necessary to mention specially so-called thermal shock among various impacts on highway surface. Ice layer is formed on a concrete surface during the winter period of pavement surfacing operation. Sodium chloride which lowers tem-

Адрес для переписки
Шевчук Леонид Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

Address for correspondence
Shevchuk Leonid I.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-97-28
ftk75@bntu.by

perature of water-ice transition temperature and causes ice thawing at negative temperature is usually used to remove ice from the pavement surface. Consequently, temperature in the concrete laying immediately under a thawing ice layer is coming down with a run that leads to significant stresses. Such phenomenon is known as a thermal shock with a meaning of local significant change in temperature. This process is under investigation, it has practical importance for an estimation of strength and longevity of a cement-concrete pavement surfacing and consequently it is considered as rather topical issue. The purpose of investigations is to develop a mathematical model and determination of shock blow permissible gradients for a cement-concrete road covering. Finite difference method has been used in order to determine stressed and deformed condition of the cement-concrete pavement surfacing of highways. A computer program has been compiled and it permits to carry out calculation of a road covering at various laws of temperature distribution in its depth. Regularities in distribution of deformation and stresses in the cement-concrete pavement surfacing of highways at thermal shock have been obtained in the paper. A permissible parameter of temperature distribution in pavement surfacing thickness has been determined in the paper. A strength criterion based on the process of micro-crack formation and development in concrete has been used for making calculations. It has been established that the thermal shock causes significant temperature gradients on the cement-concrete surfacing that lead to rather large normal stresses in the concrete surface layer. The possibility of micro-crack formation in a road covering is determined with the help of such characteristics as material strength, conditions of plate anchoring and a temperature gradient.

Keywords: temperature, gradient, stresses, strength, concrete, criterion, surfacing, highway, finite differences, icing, border, continuity, micro-cracks

Forcitation: Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N., Shevchuk L. I. (2016) Stresses in Cement-Concrete Pavement Surfacing Caused by Thermal Shock. *Science & Technique*. 15 (2), 87–94 (in Russian)

Введение

В процессе устройства, эксплуатации и ремонта дорожные одежды подвергаются различным воздействиям. Это механические нагрузки от потоков транспортных средств, изменение температуры, неравномерные осадки оснований, атмосферные осадки, механическая и химическая очистка дорог и пр. Наряду с этими воздействиями особое место занимают сезонные и суточные изменения температуры внешней среды, солнечная радиация, температурные изменения при очистке дорог от ледяных образований.

Одной из важнейших задач расчета температурных воздействий, оказываемых на цементно-бетонные дорожные покрытия, является обеспечение условий теплового режима, который был бы безопасным для эксплуатации покрытия. Если параметры режима превышают значения, предусмотренные расчетом, то покрытие теряет свои прочностные качества и несущую способность.

Температурные напряжения в цементно-бетонных покрытиях зависят от ряда факторов: характера распределения температур по сечению плиты; условий на контуре плиты (участок дорожного покрытия, ограниченный деформационными швами); напряжений от коробления плиты, если оно возможно; трения или сцепления с основанием. Однако для проектирования и устройства прочного, долговечного, экономически выгодного цементно-бетонного дорожного покрытия недостаточно иметь представление о его напряженном состоянии в зави-

симости от различных факторов, включая и температурное воздействие. Необходимо найти критерии, позволяющие установить напряженно-деформированное состояние бетона, при котором начинают образовываться микротрещины, являющиеся первопричиной начала разрушения.

Для получения достоверных результатов расчета бетонных и железобетонных конструкций, включая цементно-бетонные покрытия, следует использовать критерии, основанные на физических представлениях о процессе разрушения бетона. Этот вопрос исследовался многими учеными еще в прошлом веке [1–5].

В зимний период эксплуатации дорожных покрытий на поверхности бетона образуется слой льда. В слое бетона, находящегося под льдом, увеличивается содержание воды. Обычно для удаления льда с поверхности дорожного покрытия применяется хлористый натрий, который понижает температуру замерзания воды и вызывает таяние льда при отрицательной температуре. Так как таяние льда происходит в условиях эндотермического процесса, в бетоне на поверхности покрытия, находящегося непосредственно под тающим слоем льда, резко снижается температура. Такое явление получило название термического удара (локальное значительное изменение температуры). Из результатов испытаний следует, что в случае термического удара появляются значительные температурные градиенты на поверхностном слое дорожного покрытия.

Физические основы критерия прочности бетона

При сжатии материалов, имеющих различное сопротивление сжатию и растяжению (горные породы, бетон, чугун и др.), процесс разрушения носит более сложный характер. Некоторые принципиальные результаты, характеризующие этот вид разрушения, получены в исследованиях П. У. Бриджмена [6], А. А. Гвоздева [7], С. Д. Волкова [8, 9], О. Я. Берга [1, 4].

В опытах П. У. Бриджмен [6] обнаружил увеличение объема образцов из мрамора и талька. Как следует из результатов исследований, в первый период загрузки наблюдается уменьшение объема. Затем происходит резкое замедление скорости уменьшения объема и при дальнейшем повышении нагрузки – его увеличение. Это увеличение объема автор объяснил нарушением сплошности тела и появлением разрывов.

Теоретическое обоснование наблюдаемым фактам увеличения объема неоднородных материалов (бетон, горные породы и др.) при испытании на одноосное сжатие дано А. А. Гвоздевым [7]. Установлено, что при сжатии бетонного образца образуются микротрещины. Наиболее вероятное направление этих трещин совпадает с направлением действующего усилия. Появление начальных трещин ведет к дальнейшему нарушению структуры, сопровождающемуся кажущимся увеличением объема тела. Соединение микроскопических трещин приводит к появлению видимых трещин и в последующем – к быстрому разрушению.

Прежде всего был сделан вывод о том, что предел прочности не является критическим состоянием. Разрушение происходит постепенно за счет развития микротрещин. В 1953 г. С. Н. Журков и Б. Н. Нарзуллаев [10] обнаружили явление снижения прочности при выдержке нагрузки в условиях одноосного растяжения у самых разнообразных тел.

Если провести анализ продольных и поперечных деформаций, то оказывается, что теряют смысл такие константы, как модуль упругости и коэффициент Пуассона ν . При этом наблюдаются значения $\nu > 0,5$, что теоретически невозможно, так как это соответствовало бы увеличению объема тела при сжатии. Изме-

нение коэффициента ν и даваемое расчетом увеличение внешнего объема образца при испытании на сжатие бетона отмечались уже в исследованиях В. В. Михайлова [5], которые показали, что наблюдаемое увеличение объема бетона вытекает из предложенных им теорий строения бетона и его прочности.

Введено понятие о величине R_T , которая характеризует границу нарушения сплошности бетона за счет образования в нем микроразрушений. Эта граница является одной из важнейших особенностей материалов, имеющих различное сопротивление сжатию и растяжению, которая определяет его прочностные и деформативные свойства. Границу образования микротрещин при сжатии, соответствующую началу разрушения, следует рассматривать как важную характеристику бетона в дополнение к общепринятым константам – пределу прочности на сжатие $R_{пр}$ и сопротивлению отрыву R_p .

Постановка задачи и численная модель цементно-бетонного покрытия

Рассмотрим задачу о температурном воздействии на цементно-бетонное покрытие автомобильной дороги. Участок покрытия имеет прямоугольную форму в плане с размерами 4×6 м. Толщина покрытия принята 0,25 м. Проанализируем самый невыгодный случай. На проезжей части дороги в зимнее время года деформационные швы покрытия заполнены бетонной крошкой и льдом, что не позволяет им деформироваться. Поэтому на контуре участка дорожной одежды приняты граничные условия – горизонтальные и вертикальные перемещения равны нулю. Также принято условие примерзания дорожного покрытия к замерзшему основанию, что не допускает горизонтальных и вертикальных перемещений. Расчет выполнен методом конечных разностей. Решение получено методом простых итераций. Оси X и Y направлены горизонтально, а ось Z – по вертикали вверх (рис. 1). Слой (покрытие) считается однородным и изотропным.

Приняты следующие общие исходные данные: модуль упругости бетона класса $C^{45/55}$ $E = 44$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,16$; коэффициент температурного расширения $\alpha = 14,5 \cdot 10^{-6}$ град. $^{-1}$; призмочная прочность бетона $R_{пр} = 45$ МПа; прочность бетона на растя-

жение $R_p = 2,7$ МПа; коэффициент снижения предела прочности (из табл. 1, [4]) $k_o = 0,74$.

Таблица 1

Коэффициент снижения предела прочности на сжатие
Decrease factor of ultimate compressive strength

R_{np} , МПа	20,0	30,0	35,0	45,0	60,0
R_p , МПа	1,5	2,0	2,2	2,7	3,1
$k_o = \frac{R_p}{R_{np}}$	0,63	0,69	0,72	0,74	0,80

Для расчета цементно-бетонного покрытия автомобильных дорог от действия температуры использовали прямоугольную конечно-разностную сетку с шагами узлов по направлениям осей координат X, Y, Z , соответственно равными $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ (рис. 1).

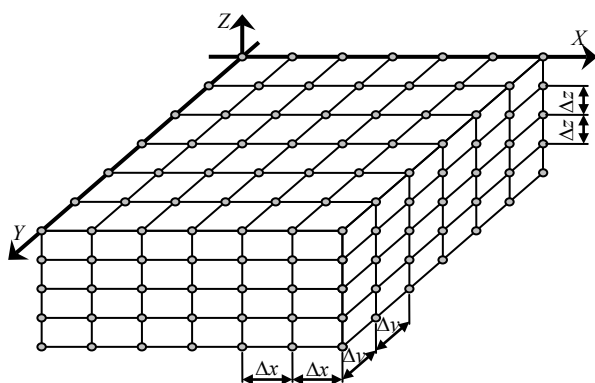


Рис. 1. Схема конечно-разностной сетки
Fig. 1. Scheme of finite-difference mesh

Для получения разрешающих конечно-разностных уравнений использовали математический аппарат линейной теории упругости. Полагали, что слой является квазиоднородным и изотропным.

Уравнение прочности для бетона дорожного покрытия

Бетон рассматривали как хрупкий материал с характерной особенностью разрушения – образованием микротрещин, предшествующих разрушению. Поэтому в качестве критерия прочности принимали напряжение, соответствующее образованию микротрещин R_T .

Если причиной образования микротрещин является растяжение ($\sigma_1 \geq 0$), то в качестве ориентира при оценке прочности следует принимать расчетное сопротивление бетона на растяжение (отрыв) R_p , а эквивалентное напряжение – равным геометрической сумме главных

напряжений. Если причина образования трещин – сжимающие напряжения ($\sigma_1 < 0$), то эквивалентным напряжением также является геометрическая сумма всех напряжений, а оценка прочности выполняется сравнением с призмочной прочностью бетона, сниженной на коэффициент k_o . Условие прочности принимает вид

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} = \begin{cases} R_p, & \text{при } \sigma_1 \geq 0; \\ k_o R_{np}, & \text{при } \sigma_1 < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где R_p, R_{np} – расчетное сопротивление (прочность) бетона на растяжение (отрыв) и призмочная прочность бетона (прочность на сжатие); k_o – коэффициент, выражающий отношение напряжения образования микротрещин к расчетному сопротивлению на сжатие (призмочной прочности).

Коэффициент k_o устанавливали испытанием бетонных образцов [4]. Значения коэффициента k_o приведены в табл. 1.

Оценка напряженно-деформированного состояния бетона при термическом ударе

Для оценки напряженно-деформированного состояния дорожного покрытия при термическом ударе, вызванном оттаиванием слоя льда на поверхности бетонного покрытия, использовали результаты эксперимента, выполненного И. В. Баландиной [11]. Согласно результатам опыта, в первые минуты оттаивания льда температура и температурный градиент в слоях покрытия распределяются, как представлено в табл. 2.

Таблица 2

Температуры и градиенты слоев покрытия
Temperatures and gradients of surfacing layers

Глубина слоя z , см	Температура слоя t , °С	Градиент температуры, °С/см
0,00	-7,0	8,00
0,50	-11,0	4,33
1,50	-13,5	1,38
3,50	-14,0	0,25

Расчет выполняли с помощью компьютерной программы PARUS, составленной на алгоритмическом языке Pascal и предназначенной для определения напряженно-деформированного состояния цементно-бетонного покрытия автомобильных дорог от температурного воздействия. Интерфейс программы показан на рис. 2.

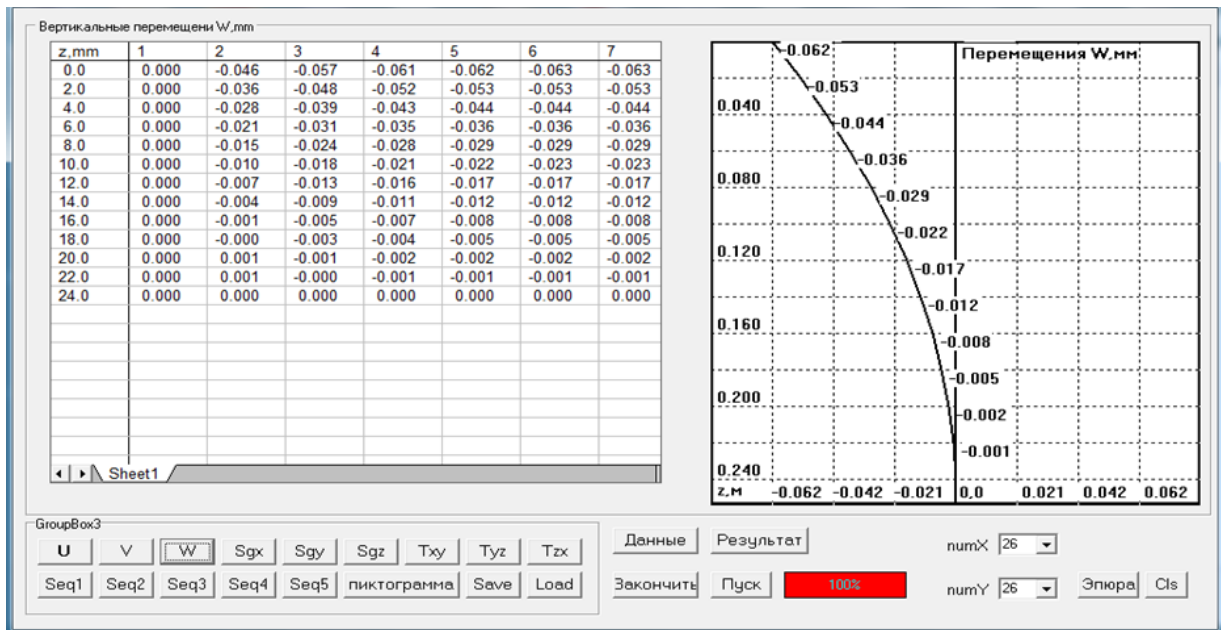


Рис. 2. Интерфейс программы PARUS

Fig. 2. Interface of PARUS program

Температура на конечно-разностной сетке получена путем интерполяции по данным опыта (табл. 2). Графики распределения температуры и перемещений по глубине покрытия показаны на рис. 3а, б). Из графиков, представленных на рис. 3, видно, что вертикальные перемещения распределены практически по линейному закону, за исключением места у верхней поверхности покрытия (рис. 3б).

Горизонтальные нормальные напряжения у поверхности покрытия являются сжимающими и принимают экстремальные значения (рис. 4а). По мере заглубления горизонтальные нормальные напряжения меняют знак на положительный и распределены равномерно на нижерасположенной части покрытия. При этом значения этих напряжений не превышают 8 % от экстремального значения.

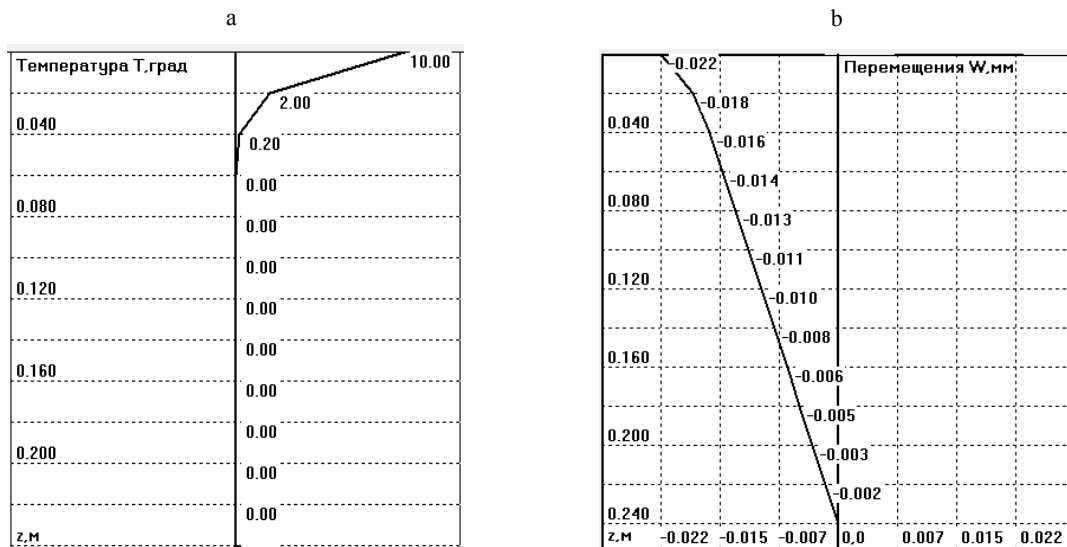


Рис. 3. Графики распределения температуры (а) и вертикальных перемещений (б) под серединой участка дорожного покрытия при термическом ударе

Fig. 3. Diagrams of temperature distribution (а) and vertical displacements (б) under middle section of pavement surfacing at thermal shock

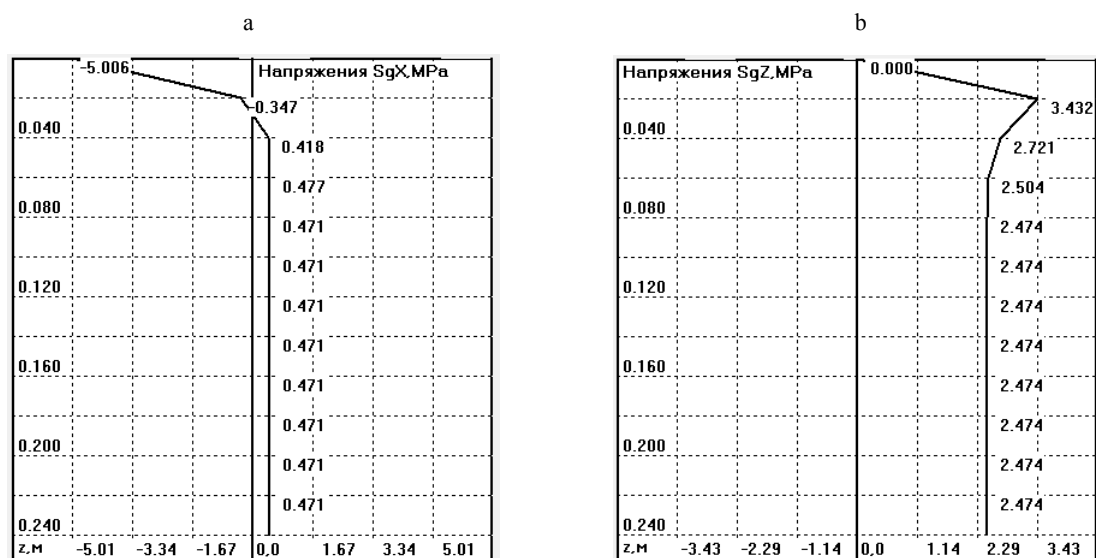


Рис. 4. Графики распределения горизонтального (а) и вертикального (б) нормальных напряжений под серединой участка дорожного покрытия при термическом ударе

Fig. 4. Distribution of horizontal (a) and vertical (b) normal stresses under middle section of pavement surfacing at thermal shock

На поверхности покрытия вертикальные нормальные напряжения равны нулю (рис. 4б). Вблизи поверхности они достигают максимума и принимают положительные значения. Затем по мере заглубления напряжения остаются положительными и практически не изменяются.

Допускаемые изменения температуры для бетонных дорожных покрытий при термическом ударе

Используя компьютерную программу RA-RUS, определяли допустимые параметры закона распределения температуры по толщине бетонного покрытия, подвергнутого термическому удару.

В качестве параметра закона изменения температуры, принятого по результатам испытания И. В. Баландиной [11], выбрали температуру верхнего слоя покрытия t_b . Сохраняя

соотношения температур в разных слоях покрытия, выполняли расчеты для различных значений параметра t_b . Результаты вычислений приведены в табл. 3.

Используя результаты расчета, приведенные в табл. 3, линейную интерполяцию, а также учитывая принятые значения $k_0 = 0,74$ МПа, $R_{пр} = 45,0$ МПа и $R_p = 2,70$ МПа, найдем предельную температуру верхнего слоя дорожного покрытия $t_{пр}$, соответствующую образованию микротрещин и разрушению бетона за счет отрыва:

$$t_{пр} = t_1 + \frac{R_p - \sigma_{eq1}}{\sigma_{eq2} - \sigma_{eq1}}(t_2 - t_1) = 7 - \frac{2,70 - 2,14}{2,75 - 2,14}(9 - 7) = 8,84 \text{ (}^\circ\text{C)}. \quad (2)$$

Таблица 3

Определение эквивалентных напряжений в дорожном покрытии при термическом ударе
Determination of equivalent stresses in pavement surfacing at thermal shock

Глубина расположения слоя z, см	Параметр закона изменения температуры, °C						
	$t_b = 1;$ $t_n = 0$	$t_b = 3;$ $t_n = 0$	$t_b = 5;$ $t_n = 0$	$t_b = 7;$ $t_n = 0$	$t_b = 9;$ $t_n = 0$	$t_b = 11;$ $t_n = 0$	$t_b = 8,39;$ $t_n = 0$
σ_{eq} , МПа	0,31	0,92	1,53	2,14	2,75	3,37	3,10
Обозначения: σ_{eq} – эквивалентное напряжение; t_b – температура поверхности цементно-бетонного слоя; t_n – температура нижнего слоя цементно-бетонной толщи, подвергнутой термическому удару.							

Полученный параметр закона изменения предельных температур t_{np} соответствует среднему предельному градиенту температур вблизи поверхности дорожного покрытия $gradt_{np}$, вызывающему образование микротрещин:

$$gradt_{np} = \frac{t_{np}}{h_i} = \frac{8,84}{3,5} = 2,53 \text{ (}^\circ\text{C/см)}, \quad (3)$$

где h_i – толщина слоя дорожного покрытия, подвергнутого термическому удару, $h_i = 3,5$ см (z , табл. 2).

ВЫВОДЫ

1. Решена задача о распределении напряжений в цементно-бетонном дорожном покрытии при различных законах распределения температуры по его толщине. Для расчета прочности цементно-бетонного покрытия автомобильных дорог при термическом ударе использован численный метод – метод конечных разностей. Полагается, что слой покрытия является квази-однородным и изотропным. Поэтому использован математический аппарат линейной теории упругости. Составлен алгоритм и разработана компьютерная программа PARUS для определения напряженного состояния бетонного слоя дорожного покрытия.

2. Критерий прочности цементно-бетонного покрытия автомобильных дорог выбирался в зависимости от напряженного состояния материала. Если максимальное главное напряжение имело значение меньше нуля, то за критерий прочности принималось напряжение образования трещин при сжатии бетона R_t . Если максимальное главное напряжение являлось растягивающим, то за критерий принималось расчетное сопротивление бетона на отрыв R_p . По результатам расчета для бетонов класса $C^{45/55}$ установлено допустимое значение градиента температуры термического удара $2,53$ $^\circ\text{C/см}$.

3. По результатам анализа напряженно-деформированного состояния цементно-бетонного покрытия автомобильных дорог, подвергнутого воздействию температурного удара, установлено, что разрушение бетона происходит в слое бетонного покрытия автомобильных дорог вблизи его поверхности. Толщина этого

слоя не превышает 4–6 мм. Также выявлено, что преобладающими являются горизонтальные нормальные напряжения, знак которых зависит от повышения или снижения температуры. Вертикальное нормальное напряжение на поверхности покрытия во всех случаях равно нулю и имеет экстремальные значения на некоторой глубине, равной примерно половине толщины цементно-бетонного слоя.

4. Для уменьшения температурных перепадов бетонных дорожных покрытий при термическом ударе рекомендуется:

- не допускать образования ледяного покрытия большой толщины (более 2 см), что требует оперативного выполнения работ по очистке дорог от снежного покрова и ото льда;
- увеличивать теплопоглощение поверхности дорожного покрытия за счет использования более темных цветов его поверхности – снижения альбедо солнечной радиации за счет засыпки поверхности покрытия угольной пылью;
- использовать комбинированные химико-фрикционные методы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берг, О. Я. Некоторые физические обоснования теории прочности бетона / О. Я. Берг // Теория расчета и конструирования железобетонных конструкций. М.: Госстройиздат, 1958. С. 14–22.
2. Скрамтаев, Б. Г. Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси / Б. Г. Скрамтаев. М.: Военно-инженерная академия, 1936. 222 с.
3. Свечин, Н. В. Упругопластические свойства цементного камня / Н. В. Свечин // Исследование по технологии бетона. М.: Стройиздат, 1950. С. 18–22.
4. Берг, О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. М.: Госстройиздат, 1952. 96 с.
5. Михайлов, В. В. Элементы теории структуры бетона / В. В. Михайлов. М.: Стройиздат, 1941. 85 с.
6. Бриджмен, П. У. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов / П. У. Бриджмен. М.: Иностранная литература, 1955. 220 с.
7. Гвоздев, А. А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия / А. А. Гвоздев. М.: Стройиздат, 1949. 280 с.
8. Волков, С. Д. Статистическая теория прочности / С. Д. Волков. М.: Машгиз, 1960. 98 с.
9. Волков, С. Д. Единая статистическая теория прочности твердых тел / С. Д. Волков // Журнал технической физики. 1953. Т. 23, № 11. С. 2025–2038.

10. Журков, С. Н. Временная зависимость прочности твердых тел / С. Н. Журков, Б. Н. Нарзуллаев // Журнал технической физики. 1953. Т. 23, № 10. С. 1677–1689.
11. Баландина, И. В. О влиянии термического удара на разрушение дорожного бетона / И. В. Баландина // Измерение физико-механических свойств и характеристик структур строительных материалов. М., 1981. С. 78–80.

Поступила 03.12.2015

Подписана в печать 05.02.2016

Опубликована онлайн 30.03.2016

REFERENCES

1. Berg O. Ya. (1958) Some Physical Substantiation of Concrete Strength Theory. *Theory for Calculation and Design of Reinforced Concrete Constructions*. Moscow, Gosstroyizdat, 14–22 (in Russian).
2. Skramtaev B. G. (1936) *Investigation of Concrete Strength and Time-Yield in Concrete Mixture*. Moscow: Military Engineering Academy. 222 (in Russian).
3. Svechin N. V. (1950) Elastic-Plastic Properties of Hardened Cement Paste. *Investigations on Concrete Technology*. Moscow, Stroyizdat, 18–22 (in Russian).
4. Berg O. Ya. (1952) *Physical Principles for Concrete and Reinforced Concrete Strength Theory*. Moscow, Gosstroyizdat. 96 (in Russian).
5. Mikhailov V. V. (1941) *Elements of Concrete Structure Theory*. Moscow, Stroyizdat. 85 (in Russian).
6. Bridgman P. W. (1952) *Studies in Large Plastic Flow and Fracture: with Special Emphasis on the Effects of Hydrostatic Pressure*. New York-London: McGraw-Hill. 362 (Russ. ed.: Bridgman P. W. (1955) *Issledovanie Bolshikh Plasticheskikh Deformatsii i Razryva. Vliianie Vysokogo Gidrostaticheskogo Davleniia na Mekhanicheskie Svoistva Materialov*. Moscow, Inostrannaya Literatura. 220).
7. Gvozdev A. A. (1949) *Calculation of Structure Bearing Capacity using Limit Equilibrium Method*. Moscow, Stroyizdat. 280 (in Russian).
8. Volkov S. D. (1960) *Statistical Strength Theory*. Moscow, Mashgiz. 98 (in Russian).
9. Volkov S. D. (1953) Unified Statistical Strength Theory of Solid Bodies. *Zhournal Tekhnicheskoy Fiziki* [Journal of Technical Physics], 23 (11), 2025–2038 (in Russian).
10. Zhurkov S. N., Narzullaev B. N. (1953) Time Dependence of Strength in Solid Bodies. *Zhournal Tekhnicheskoy Fiziki* [Journal of Technical Physics], 23 (10), 1677–1689 (in Russian).
11. Balandina I. V. (1981) About Effect of Thermal Shock on Road Concrete Fracture. *Measurement of Physical and Mechanical Properties and Characteristics of Construction Material Structures*. Moscow, 78–80 (in Russian).

Received: 03.12.2015

Accepted: 05.02.2016

Published online: 30.03.2016