

doi: 10.5862/MCE.59.3

Факторы, влияющие на разрушение бетона дорожных плит Factors affecting the deterioration of concrete pavement slabs

*Канд. техн. наук, доцент Н.М. Морозов,
канд. техн. наук, доцент Н.М. Красникова,
канд. техн. наук, старший преподаватель
И.В. Боровских,
Казанский государственный архитектурно-
строительный университет, г. Казань,
Россия*

*N.M. Morozov,
N.M. Krasnikova,
I.V. Borovskikh,
Kazan State University of Architecture and
Engineering, Kazan, Russia*

Ключевые слова: дорожные плиты; прочность; морозостойкость; водопоглощение; высокоалюминатный цемент

Key words: road slabs; strength; frost resistance; water absorption; high alumina cement

Аннотация. Работа конструкций в реальных условиях эксплуатации связана с воздействием окружающей среды. Для бетонов дорожных и аэродромных покрытий важна стойкость не только к механическим разрушениям, но и к воздействию попеременного замораживания и оттаивания. На примере дорожных плит заводского изготовления показаны причины раннего разрушения бетона. Установлены причины потери эксплуатационных свойств дорожного полотна, которые в первую очередь зависят от качества исходных материалов в бетоне. Установлено, что важными факторами, определяющими морозостойкость бетона дорожного полотна, помимо прочности, являются однородность и пористость бетона. Показано, что высокое содержание алюминатов в цементе приводит к разрушению бетона в первый год эксплуатации конструкций. Полученные результаты также могут косвенно свидетельствовать о нарушении технологии формирования дорожных плит на этапе производства.

Abstract. The behavior of constructions under actual operating conditions is affected by exposure to the environment. It is important that concrete roads and airport pavings are resistant not only to mechanical damage, but also to the effects of alternate freezing and thawing. The causes of early failure in concrete have been shown using prefabricated road slabs as an example. The causes of loss of performance properties of the roadway have been established, which are primarily dependent on the quality of raw materials in the concrete. It was found that, aside from durability, uniformity and porosity are important factors in determining the frost resistance of concrete roadways. It was shown that high aluminate content in the cement leads to concrete destruction in the first year of structure use. The results may also indirectly indicate a violation of forming technology during slab production.

Введение

Долговечность дорожных покрытий определяется способностью сохранять эксплуатационную пригодность в течение определенного срока службы, заданного в проекте. Цементобетонные дорожные покрытия в процессе эксплуатации подвергаются внешним воздействиям: механическим (от движущегося транспорта), физическим и физико-химическим воздействиям окружающей среды и химических реагентов, используемых при зимнем содержании дорог [1–4]. Поэтому долговечность дорожных покрытий зависит от их соответствия условиям работы – воздействиям внешней среды.

В условиях России главным фактором агрессивного климатического воздействия на дорожный бетон является попеременное замораживание и оттаивание в присутствии водных растворов хлористых солей-антиобледенителей, особенно хлорида натрия. Именно воздействие хлорида натрия совместно с замораживанием–оттаиванием наиболее агрессивно по сравнению с другими антиобледенителями [5]. Соответственно, на первый план в обеспечении долговечности цементобетонных покрытий выходит надежная, гарантированно высокая морозостойкость бетона [6, 7]. Ее увеличению способствует ограничение максимального значения водоцементного отношения с одновременным уменьшением его главной структурной составляющей – цементного камня [8, 9]. Тем не менее, во многих случаях соблюдение данного правила не предотвращает

Морозов Н.М., Красникова Н.М., Боровских И.В. Факторы, влияющие на разрушение бетона дорожных плит

разрушение бетонных конструкций. Необходимо проводить дополнительные исследования состава бетона для выявления причин разрушения уже изготовленных изделий.

Немаловажным фактором является и прочность бетона на сжатие, которая определяет износостойкость цементобетонного покрытия, стойкость бетона к истиранию, скалыванию кромок плит, ударную стойкость, готовность к нарезке швов и раннему открытию движения и др. Прочность, как и морозостойкость, зависит от состава бетона, технологии его уплотнения и режима твердения [10]. При изготовлении бетона для дорожных покрытий важны свойства исходных материалов и, в большей степени, цемента и химических добавок. Так, например, увеличение содержания трехкальциевого алюмината в составе цементного клинкера ведет к снижению морозостойкости, а наличие в составе бетона некачественного щебня – к снижению и прочности, и морозостойкости [11–13]. Все эти факторы могут быть отрегулированы при изготовлении дорожных плит на заводах сборного железобетона. Однако в некоторых случаях (недостаточный контроль на производстве или недобросовестность поставщиков материалов) дорожные плиты могут разрушаться уже в первый год эксплуатации, хотя по прочностным характеристикам они соответствуют требованиям нормативных документов. Поэтому исследование причин разрушения уже уложенных в покрытие дорожных плит является важной технической и научной задачей как для исследователей, так и для практиков. Для получения полной картины причин, по которым происходит разрушение, необходимо не только оценивать прочность и морозостойкость бетона конструкций, но и исследовать параметры структуры и химический состав новообразований. Такое комплексное использование современных методов исследования позволит уже на раннем этапе эксплуатации спрогнозировать срок службы конструкций и возможные пути повышения их долговечности. В связи с этим целью работы стало выявление причин разрушения бетона дорожных плит на ранних этапах эксплуатации. Исследование проведено на примере дорожных плит, эксплуатировавшихся 6 месяцев в осенне-зимний период при малой интенсивности движения автомобильного транспорта (открытая стоянка машин).

Материалы и методы

Исследование образцов бетона, отобранных из дорожной плиты покрытия, проведено на основании испытаний как по стандартным методикам, регламентируемым нормативными документами (ГОСТ 28570–90, ГОСТ 10180–12, ГОСТ 21924.0–84, ГОСТ 26633–2012, ГОСТ 12730.3–78, ГОСТ 12730.1–78, ГОСТ10060–12, 31384–2008), так и по нестандартным, отвечающим задачам исследования и обеспечивающим необходимую точность и надежность – рентгенофазовый анализ (дифрактометр Bruker D8) и др.

Для оценки однородности и прочности бетона дорожного настила был произведен отбор кернов и их подготовка по ГОСТ 28570–90: №1 – верхний слой при эксплуатации или нижний слой при формовании; №2 – нижний слой при эксплуатации или верхний слой при формовании.

Результаты и обсуждения

На первом этапе исследования была произведена оценка прочности бетона из нижнего и верхнего слоев дорожных плит. Результаты испытаний физико-механических свойств бетона плит представлены в таблице 1.

Таблица 1. Прочность образцов, отобранных из плит дорожного настила

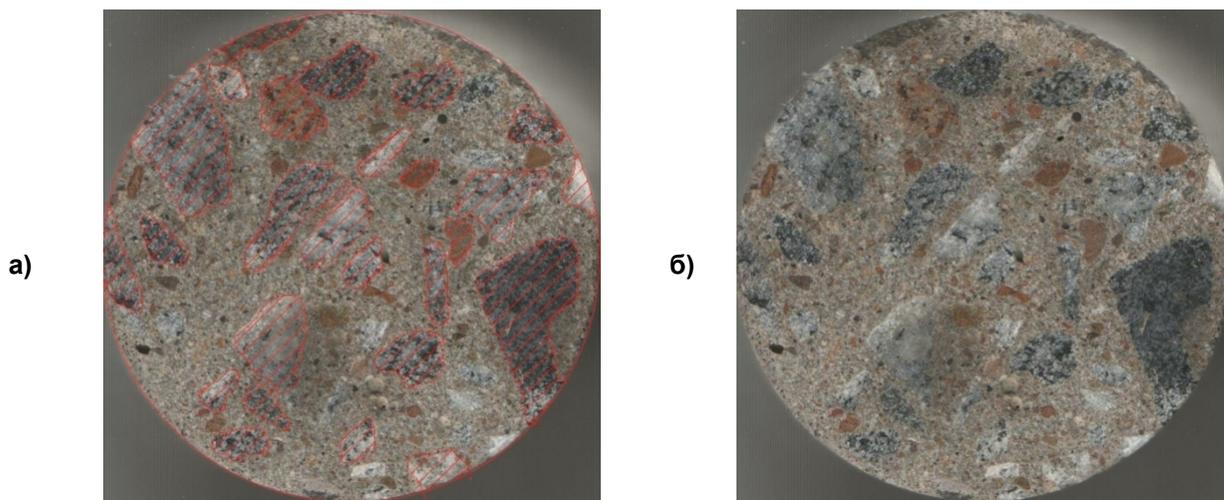
Слой плиты	№ образца	Характеристики образца		Показания пресса, кН	Приведенная прочность, МПа
		диаметр, см	плотность, кг/м ³		
Верхний слой	1.1	6.5	2436	153.4	44.86
	1.2	6.5	2433	150.5	44.00
	среднее				44.43
Нижний слой	2.1	6.5	2392	135.6	39.65
	2.2	6.5	2390	136.7	39.97
	среднее				39.81

Примечание: плиты формовались рабочей поверхностью вниз.

Из таблицы 1 видно, что прочность бетона соответствует классу по прочности В30. Следует отметить, что верхний слой дорожных плит, при изготовлении находящийся снизу, имеет прочность на 11.6 % выше нижнего слоя, что косвенно доказывает расслоение бетонной смеси и

свидетельствует о нарушении технологии формования. Неоднородность по составу может быть вызвана использованием подвижных смесей.

Расслоение смеси можно проследить по распределению крупного заполнителя в теле бетона. Для этого поверхность среза образцов-кернов предварительно тщательно промывалась водой, после чего фиксировалась на цифровую камеру. Затем полученные изображения передавались на компьютер, где при помощи программного продукта AutoCAD производилось выделение поверхности заполнителей с общего фона среза образцов кернов. Далее программный продукт производил расчет площади выделенного крупного заполнителя, и вычислялось отношение площади всех зерен крупного заполнителя к общей площади образца (рис. 1). Таким образом, полученное отношение является оценкой объемного содержания крупного заполнителя в затвердевшем бетоне.



**Рисунок 1. Пример графической обработки образца-керна затвердевшего бетона:
а – после выделения крупного заполнителя с общего фона среза образца керна;
б – исходная поверхность образца**

Содержание крупного заполнителя – щебня из изверженных горных пород – в бетоне находится в интервале от 28.3 % до 43.7 % по объему и от 750 до 1158.1 кг/м³, что подтверждает факт расслоения бетонной смеси. Полученные результаты согласуются с данными, полученными при определении прочности бетона.

Также одной из важнейших характеристик дорожного бетона являются параметры его порового пространства, влияющие на эксплуатационные свойства, главным образом на морозостойкость. При определении порового пространства обычно исходят из трех структурных свойств: пористости, внутренней удельной поверхности пор и разделения пор по размерам.

Водопоглощение бетона является косвенной характеристикой его пористости, поэтому было оценено водопоглощение бетона дорожных плит и дана приближенная оценка строения его порового пространства.

Полученные результаты превышают допустимое значение: согласно ГОСТ 21924 водопоглощение бетона дорожных плит не должно превышать 5 % по массе. Причем нижняя часть бетона дорожных плит превышает норму на 4.2 % , верхняя – на 18.8 %. Увеличение пористости верхнего слоя плит объясняется воздействием внешних факторов при эксплуатации.

Приближенная оценка строения порового пространства бетона получена по кинетике водопоглощения в соответствии со стандартной методикой. По результатам испытания рассчитано относительное водопоглощение по массе в момент времени $t_1 = 0.25$ ч – W_1 и $t_2 = 1$ ч – W_2 . Затем графоаналитическим методом по результатам расчета кривой насыщения и номограмме определяли параметры α и λ , характеризующие строение порового пространства дорожного бетона. Результаты эксперимента и проведенных расчетов по опытным данным представлены в таблице 2.

Таблица 2. Водопоглощение бетона, отобранного из дорожного полотна

№ п/п	Положение керна	Водопоглощение образцов, %, через				$W_{t=0.25}$ W_{max}	$W_{t=1}$ W_{max}	Показатели пористости	
		0.25 ч ($W_{t=0.25}$)	1 ч ($W_{t=1}$)	24 ч	7 сут (W_{max})			λ	α
1	Верхняя часть	2.05	3.45	5.11	5.42	0.38	0.64	1.05	0.55
2		2.22	3.71	5.59	5.94	0.37	0.62	0.96	0.56
3	Нижняя часть	1.87	3.32	5.04	5.27	0.35	0.63	1.01	0.61
4		1.9	3.2	4.85	5.15	0.37	0.62	0.96	0.56

Примечание: W_t – водонасыщение образца за время t ; W_{max} – максимальное водонасыщение; α – коэффициент, характеризующий степень однородности капилляров по их радиусам; λ – средний радиус капилляров.

Показатели пористости α и λ свидетельствуют об одинаковом поровом строении бетона дорожного полотна. При этом водонасыщение в первые минуты свидетельствует о наличии крупных пор, которые снижают морозостойкость бетона: общеизвестно, что уменьшение среднего радиуса капилляров повышает морозостойкость бетона, так как вода в таких капиллярах замерзает при более низких температурах.

Авторы [14], считают, что пропаривание изделий по более жесткому режиму приводит к увеличению открытой пористости и, как следствие, снижению морозостойкости. Поэтому полученные результаты косвенно могут свидетельствовать о нарушении режима тепловлажностной обработки при производстве дорожных плит.

Основной характеристикой долговечности дорожных плит является сохранение свойств бетона при замораживании, то есть его морозостойкость. При этом степень повреждения бетона при замораживании зависит от степени его водонасыщения [15].

Морозостойкость бетона определяли ускоренным методом (третий метод по ГОСТ 10060–2012) с нарушением количества и вида образцов. Отклонение от метода испытаний было вызвано ограничением отбора количества образцов на объекте. Результаты по потере массы образцов представлены в таблице 3 и на рисунках 2, 3.

Таблица 3. Морозостойкость бетона дорожных плит

Образец	Масса образцов, гр		
	Насыщенных по ГОСТ 10060-12, п.5.5.2	Через 5 циклов / потеря массы, %	Через 7 циклов / потеря массы, %
Нижняя часть	483.45	470.05/2.76	457.24/5.73
	476.00	465.04/2.36	448.38/6.16
Верхняя часть	478.61	464.14/3.1	456.16/4.92
	477.99	467.05/2.34	458.70/4.2

Из таблицы 3 видно, что потеря массы через 5 циклов превышает допустимые 2 %. Таким образом, образцы не выдержали марку по морозостойкости $F_2 100$.

Так как морозостойкость дорожного бетона – основная характеристика долговечности, рассмотрены некоторые способы ее увеличения.

Увеличение морозостойкости бетона может быть достигнуто понижением В/Ц, что объясняется в основном упрочнением структуры цементного камня и бетона, уменьшением его капиллярной пористости, которая пропорциональна снижению количества воды затворения. Еще один вариант – за счет применения воздухововлекающих добавок [16, 17].

Увеличению морозостойкости способствует ограничение максимального значения водоцементного отношения и одновременное уменьшение его главной структурной составляющей – цементного камня [18]. Однако по мнению автора [19], морозостойкость дорожного бетона более 300 циклов по II методу будет обеспечена, если расход цемента составит более 340 кг/м^3 , В/Ц < 0.45 и при прочности бетона более 40 МПа.



Рисунок 2. Образцы через 5 циклов



Рисунок 3. Образцы через 7 циклов

На рисунках 2, 3 показана степень разрушения образцов после испытаний. Следует отметить, что полученные результаты согласуются с данными по водопоглощению.

Нормативные документы регламентируют обязательное использование в дорожных бетонах химических добавок пластифицирующего и воздухововлекающего действия. Уменьшение водопоглощения должно положительно отразиться на морозостойкости бетона, а воздухововлечение является одним из способов повышения морозостойкости при условии создания замкнутой пористости [20, 21].

Влияние вида пластифицирующей добавки на морозостойкость бетона показано в таблице 4.

Добавки поликарбоксилатного действия обладают большим водоредуцирующим эффектом и низким воздухововлечением, за счет чего уплотняется структура и снижается проницаемость бетона из-за отсутствия микропор, и, как следствие, повышается его морозостойкость. Однако добавки на нафталинформальдегидной основе обладают некоторым воздухововлечением, за счет чего повышается морозостойкость бетона на ее основе.

Таблица 4. Морозостойкость и водонепроницаемость тяжелого бетона из смесей с подвижностью ПЗ-П4

№ п/п	Класс бетона	Расход цемента, кг/м ³	Вид и расход добавки	Водонепроницаемость, марка	Морозостойкость, марка
1*	B45	420	Поликарбоксилат 1 %	W14	F300
2**	B45	410	Поликарбоксилат 0.5 %	W16	F200
3	B40	395	Поликарбоксилат 0.4 %	W14	F200
4	B30	410	Нафтал.-форм. 0.7 %	W12	F200

* – данные Гамалий Е.А. [22]; ** – данные Ибрагимов Р.А. [23]

Таким образом, морозостойкость бетона не зависит от типа пластификатора (поликарбоксилатные или нафталинформальдегидные).

Другим немаловажным фактором является вид применяемого цемента. Известно, что свойства основных минералов, – гидросиликатов гидроалюминатов – образующихся в цементном камне, различны по прочности и скорости образования, а также водостойкости, что важно для морозостойкости цементного камня. Авторами [24, 25] установлено, что гидроалюминат кальция, являющийся основным минералом алюминатной фазы, характеризуется низкой водостойкостью и в воде теряет прочность.

Поэтому для бетонов с высокими требованиями по морозостойкости необходимо использовать портландцементы с содержанием трехкальциевого алюмината (C_3A) в количестве не более 8 % по массе. Часто на это мало обращают внимание и повышают морозостойкость за счет увеличения активности цемента или его расхода. На примере трех цементах (ПЦ 600Д0 «Новоросцемент», ПЦ 500Д0 «Вольскцемент», ПЦ 500Д0 «Искитимцемент») показано влияние активности цемента и его расхода на морозостойкость бетона (табл. 5).

Во всех составах бетона применялся суперпластификатор на нафталин-формальдегидной основе, подвижность смесей П4.

Таблица 5. Влияние вида цемента на морозостойкость бетона

Вид цемента	Класс бетона по прочности	Расход цемента, кг/м ³	Потеря прочности после 200 циклов, %
ПЦ 600Д0 «Новоросцемент»	B30	370	8.5
ПЦ 500Д0 «Вольскцемент»	B25	384	3.4
ПЦ 500Д0 «Искитимцемент»	B25	387	11.2

Как видно из полученных данных, при равном расходе цемента потеря прочности после 200 циклов попеременного замораживания и оттаивания в солях варьируется от 3.4 до 11.2 %. Причем увеличение марки бетона по прочности на сжатие не всегда увеличивает морозостойкость. Выше уже говорилось об отрицательном влиянии алюминатов кальция, которое видно на примерах ПЦ 500Д0 «Вольскцемент» и ПЦ 500Д0 «Искитимцемент» с содержанием трехкальциевого алюмината C_3A соответственно 4 % и 10 %.

Для более детального установления причин разрушения дорожных плит исследовались продукты гидратации бетона.

Определение фазового состава бетона плит проводилось на дифрактометре Bruker D8 (табл. 6) по дифрактограммам (угловой диапазон $110 \leq 2\theta \leq +169$, абсолютная погрешность измерения углов 0.01 град.).

Таблица 6. Рентгенофазовый анализ

Phase Name	Wt. %	Phase Name	Wt. %
C_3S monoclinic (NISHI)	7.3	Ettringite	3.6
C_2S beta (MUMME)	1.9	hydroalumite	7.4
C_3A cubic	0.3	Calcite	16.0
C_4AF	1.4	Albite	20.5
Quartz	13.3	Phlogopite 1M Mica	17.2
Gypsum	0.6	Actinolite	2.0
Portlandite	8.6		

Как видно из результатов химического анализа бетона (табл. 6), имеется большое содержание алюминатной фазы в цементном камне (этtringит и AFm-фаза).

Процесс образования гидроалюминатов кальция (AFm) [26, 27] при твердении цемента сопровождается контракцией (химической усадкой), которая значительно больше, чем при гидратации алита и белита. Увеличение контракции ведет к увеличению пористости бетона и, следовательно, к снижению морозостойкости. При замерзании бетона в жидкой среде (вода или растворы солей) происходит растворение метастабильных кристаллогидратов гидросульфалюминатов кальция и выкристаллизация более стабильных веществ. Это приводит к снижению прочности бетона и сопротивляемости морозному разрушению.

На основании полученных данных рентгенофазового анализа можно сделать вывод, что бетон дорожных плит содержит высокоалюминатный цемент.

Количество хлора в составе бетона определяли с помощью иономера лабораторного И-160МИ, предназначенного для измерения показателя активности и концентрации ионов хлора. Максимально допустимое содержание хлоридов в бетоне, выраженное в процентах хлорид-ионов от массы цемента, не должно превышать для преднапряженных конструкций 0.1 % (табл. 7).

Таблица 7. Содержание хлорид-ионов в составе бетона

№	Содержание хлорид-ионов, мг/л	В перерасчете от расхода цемента*, %	Требования по ГОСТ 31384–2008
№1 – верхний слой дорожной плиты	33.5	0.168	до 0.1 % от массы цемента
№2 – нижний слой дорожной плиты	27.8	0.139	до 0.1 % от массы цемента
№3 Бетон В40**	1.43	0.007	до 0.1 % от массы цемента

Примечания:

* Расход цемента приняли по СНиП 82-02-95 для класса бетона по прочности В30.

** Ц = 450 кг/м³, Щ = 1050 кг/м³, П = 850 кг/м³, СП1 = 0,6 % от массы цемента, В/Ц = 0.45.

Из таблицы 7 видно, что в представленных образцах количество хлора превышает нормативное значение.

По нашему мнению, высокое содержание ионов хлора может быть вызвано двумя факторами: обработкой дорожного покрытия противогололедными реагентами, содержащими соединения хлора, или использованием хлорсодержащих компонентов при производстве бетонной смеси для дорожных плит.

Заключение

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

- 1) при производстве дорожных плит нарушена технология их формования, о чем свидетельствуют данные соотношения крупного заполнителя по высоте плиты и наличие открытой пористости;
- 2) в составе бетона использовались материалы, не отвечающие нормативным требованиям для дорожных изделий, а именно портландцемент с высоким содержанием алюминатной фазы.

Таким образом, на примере дорожных плит, эксплуатировавшихся в течение 6 месяцев (осенне-зимний период) при малой интенсивности движения автомобильного транспорта (стоянка машин) установлены факторы, повлекшие разрушение бетона плит. Основная причина потери эксплуатационных свойств – низкая морозостойкость бетона дорожных плит.

Для обеспечения требования по морозостойкости дорожных изделий необходим тщательный контроль за материалами и параметрами их производства.

Работа выполнена по заданию №7.1955.2014/К в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации.

Литература

1. Шейнин А.М., Эккель С.В. Обеспечение качества бетонной смеси и бетона при строительстве монолитных покрытий и оснований // Наука и техника в дорожной отрасли. 2003. №2 (25). С. 18–21.
2. Aguirre A. M., Mejía de Gutiérrez R. Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions // Materiales de Construcción. 2013. Vol. 63(309). Pp. 7–38.

References

1. Sheynin A.M., Ekkel S.V. Obespecheniye kachestva betonnoy smesi i betona pri stroitelstve monolitnykh pokrytiy i osnovaniy [Ensuring the quality of concrete mixture and concrete in the construction of monolithic coatings and bases]. *Science and technology in the road sector*. 2003. No. 2(25). Pp. 18–21. (rus)
2. Aguirre A.M., Mejía de Gutiérrez R. Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions. *Materiales de Construcción*. 2013. Vol. 63(309), Pp. 7–38.

Морозов Н.М., Красникова Н.М., Боровских И.В. Факторы, влияющие на разрушение бетона дорожных плит

3. Li Y. J., Gong Y. L., Yin J. Strength and Durability of High Performance Road Concrete Containing Ultra-Fine Fly Ash // *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vols. 99–100. Pp. 126–1268.
4. Du X. Y., Li Z., Shao B. Experimental Study of the Performance of C60 Pavement Concrete // *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 331. Pp. 527–530.
5. Shi X., Xie N., Fortune K., Gong J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 30. Pp. 125–138.
6. Haitao Y., Shizhu T. Preparation and properties of high-strength recycled concrete in cold areas // *Materiales de Construcción*. 2015. Vol. 65(318). e 050. doi: 10.3989/mc.2015.03214.
7. Zhou S. B., Shen A. Q. The Relationship between Concrete Road Performance and Salt Frost // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 857. Pp. 271–276.
8. Штарк И., Вихт Б. Долговечность бетона. Киев: Оранта, 2004. 301 с.
9. Zhang J. X., Kong X. J., Wang C. Study on Freezing-and-Thawing Durability of Cement Concrete Based on Experimental Investigation of Air-Void Parameters // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 857. Pp. 212–221.
10. Ибрагимов Р.А., Пименов С.И., Изотов В.С. Влияние механохимической активации вяжущего на свойства мелкозернистого бетона // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. №2. С. 63–69.
11. Красникова Н.М., Морозов Н.М., Боровских И.В., Хозин В.Г. Опыт внедрения мелкозернистых бетонов при производстве дорожных плит // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. №7. С. 46–54.
12. Romero H.L., Enfedaque A., Gálvez J.C., Casati M.J. Complementary testing techniques applied to obtain the freeze-thaw resistance of concrete // *Materiales de Construcción*. 2015. Vol. 65(317). e048. doi: 10.3989/mc.2015.01514.
13. Kobayashi M., Nakakuro E., Kodama K., Negami S. Freeze-thaw resistance of superplasticized concrete // *Development in the use of superplasticizers. Special publication 68 ACI-Detroit*. 1981. Pp. 269–282.
14. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние. 1989. 128 с.
15. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П. Долговечность бетона в агрессивных средах: Совм. Изд. СССР–ЧССР–ФРГ. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
16. Красникова Н.М., Морозов Н.М., Хохлаков О.В., Хозин В.Г. Оптимизация состава цементного бетона для аэродромных покрытий // *Известия КазГАСУ*. 2014. №2. С. 166–172.
17. Трофимов Б.Я., Горбунов С.П. Дорожные бетоны повышенной морозостойкости // *Цемент и его применение*. 2011. №6. С. 66–69.
18. Шестоперов С.В. Долговечность бетона транспортных сооружений. М.: Транспорт, 1966. 500 с.
19. Подмазова С.А. Проектирование составов бетона для транспортных сооружений // *Бетон и железобетон – пути развития. Научные труды 2-ой Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону. Том 1. Пленарные доклады*. М.: Дипак, 2005. 440 с.
20. Якулов М.И., Морозов Н.М., Боровских И.В., Хозин В.Г. Модифицированный мелкозернистый бетон для возведения монолитных покрытий взлетно-посадочных полос аэродромов // *Известия КазГАСУ*. 2013. №4. С. 257–261.
21. Spiratos N., Page M., Mailvaganam N.P., Malhotra V.M., Jolicoeur C. Superplasticizers for Concrete. *Fundamentals, Technology and Practice*. Ottawa (Canada). 2003. 322 p.
3. Li Y.J., Gong Y.L., Yin J. Strength and Durability of High Performance Road Concrete Containing Ultra-Fine Fly Ash. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vols. 99–100. Pp. 1264–1268.
4. Du X.Y., Li Z., Shao B. Experimental Study of the Performance of C60 Pavement Concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 331. Pp. 527–530.
5. Shi X., Xie N., Fortune K., Gong J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Construction and Building Materials*. 2012. No. 30. Pp. 125–138.
6. Haitao Y., Shizhu T. Preparation and properties of high-strength recycled concrete in cold areas. *Materiales de Construcción*. 2015. Vol. 65(318). e 050. doi: 10.3989/mc.2015.03214.
7. Zhou S.B., Shen A.Q. The Relationship between Concrete Road Performance and Salt Frost. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 857. Pp. 271–276.
8. Shtark I., Vikht B. Dolgovechnost betona [Durability of concrete]. Kiyev. Oranta. 2004. 301 p. (rus)
9. Zhang J.X., Kong X.J., Wang C. Study on Freezing-and-Thawing Durability of Cement Concrete Based on Experimental Investigation of Air-Void Parameters. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 857. Pp. 212–221.
10. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Vliyanie mekhanokhimicheskoy aktivatsii vyazhushchego na svoystva melkozernistogo betona [The effect of mechanochemical activation of binder on the properties of fine-grained concrete]. *Magazine of civil engineering*. 2015. No. 2. Pp. 63–69. (rus)
11. Krasnikova N.M., Morozov N.M., Borovskikh I.V., Khozin V.G. Opyt vnedreniya melkozernistykh betonov pri proizvodstve dorozhnykh plit [Experience of introduction of fine-grained concrete when producing road plates]. *Magazine of civil engineering*. 2014. No. 7. Pp.46–54. (rus)
12. Romero H.L., Enfedaque A., Gálvez J.C., Casati M.J. Complementary testing techniques applied to obtain the freeze-thaw resistance of concrete. *Materiales de Construcción*. 2015. Vol. 65(317). e048. doi: 10.3989/mc.2015.01514.
13. Kobayashi M., Nakakuro E., Kodama K., Negami S. Freeze-thaw resistance of superplasticized concrete. Development in the use of superplasticizers. *Special publication 68 ACI-Detroit*. 1981. Pp. 269–282.
14. Sheykin A.E., Dobshits L.M. Tsementnyye betony vysokoy morozostoykosti [Cement concrete with high frost resistance]. Leningrad: Stroyizdat, Leningr. otdeleniye, 1989. 128 p. (rus)
15. Alekseyev S.N., Ivanov F.M., Modry S., Shissl P. Dolgovechnost betona v agressivnykh sredakh [Durability of concrete in aggressive environments]. Moscow: Stroyizdat. 1990. 320 p. (rus)
16. Krasnikova N.M., Morozov N.M., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Optimizatsiya sostava tsementnogo betona dlya aerodromnykh pokrytiy. [To optimize the composition of cement concrete for airfield pavements]. *News of the KSAUE*. 2014. No. 2. Pp. 166–172. (rus)
17. Trofimov B.Ya., Gorbunov S.P. Dorozhnyye betony povyshennoy morozostoykosti. [Road concrete of heightened frost resistance]. *Cement and its application*. 2011. No. 6. Pp. 66–69. (rus)
18. Shestoperov S.V. Dolgovechnost betona transportnykh sooruzheniy. [Durability of concrete and reinforced concrete structures]. Moscow. Transport. 1966. 500 p. (rus)
19. Podmazova S.A. Proyektirovaniye sostavov betona dlya transportnykh sooruzheniy [Design of concrete mixtures for transportation structures]. *Concrete and reinforced concrete – development path. Proceedings of 2 all-Russian (International) conference on concrete and reinforced concrete*. Vol 1. Moscow. Dipak. 2005. 440 p. (rus)

Morozov N.M., Krasnikova N.M., Borovskikh I.V. Factors affecting the deterioration of concrete pavement slabs

22. Гамалий Е.А. Комплексные модификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов и активных минеральных добавок для тяжелого конструкционного бетона. Автореф. дисс. канд. технич. наук. Челябинск. 2009. 18 с.
23. Изотов В.С., Ибрагимов Р.А. Влияние комплексной добавки на долговечность тяжелого бетона // Известия КазГАСУ. 2011. №2. С.190–194.
24. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. Л.: Стройиздат, 1983. 132 с.
25. Шестоперов С.В. Долговечность бетона транспортных сооружений. М.: Транспорт, 1966. 500 с.
26. Грищенко Р.О. Термодинамические свойства кристаллических фаз, образующихся при получении глинозема методом Байера. Дисс. канд. хим. наук. 2014. 121 с.
27. Шейнин А.М. Цементобетон для дорожных и аэродромных покрытий. М.: Транспорт, 1991. 151 с.
20. Yakupov M.I., Morozov N.M., Borovskikh I.V., Khozin V.G. Modifitsirovanny melkozernisty beton dlya vozvedeniya monolitnykh pokrytiy vzletno-posadochnykh polos aerodromov [Modified fine-grained concrete for construction of monolithic coverings of runways of airfields]. *News of the KSAUE*. 2013. No. 4. Pp. 257–261. (rus)
21. Spiratos M.P., Mailvaganam N.P., Malhotra V.M., Jolicoeur C. Superplasticizers for Concrete. Fundamentals, Technology and Practice. Ottawa (Canada). 2003. 322 p.
22. Gamaliy E.A. *Kompleksnyye modifikatory na osnove efirov polikarboksilatov i aktivnykh mineralnykh dobavok dlya tyazhelogo konstruksionnogo betona* [Complex modifiers on the basis of ether polycarboxylates and active mineral additives for heavy structural concrete]. Abstract of thesis of candidate of technical sciences: 05.23.05. Chelyabinsk. 2009. 18 p. (rus)
23. Izotov V.S., Ibragimov R.A. Vliyaniye kompleksnoy dobavki na dolgovechnost tyazhelogo betona [The influence of complex additive on heavy-aggregate concrete durability]. *News of the KSAUE*. 2011. No. 2. Pp.190–194. (rus)
24. Kuntsevich O.V. *Betony vysokoy morozostoykosti dlya sooruzheniy Kraynego Severa* [Concretes with high frost resistance for the plants of the far North]. Leningrad. Stroyizdat. 1983. 132 p. (rus)
25. Shestoperov S.V. *Dolgovechnost betona transportnykh sooruzheniy* [Durability of concrete and reinforced concrete structures]. Moscow. Transport. 1966. 500 p. (rus)
26. Grishchenko R.O. *Termodinamicheskiye svoystva kristallicheskikh faz, obrazuyushchikhsya pri poluchenii glinozema metodom Bayera* [Thermodynamic properties of crystalline phases formed during the obtaining of alumina by the Bayer's method]. The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of chemical Sciences: 02.00.04, 2014. 121 p. (rus)
27. Sheynin A.M. *Tsementobeton dlya dorozhnykh i aerodromnykh pokrytiy* [Concrete for road and airfield pavements]. Moscow. Transport. 1991. 151 p. (rus)

Николай Михайлович Морозов,
+7(903)3144226; эл. почта: nikola_535@mail.ru

Nikolai M. Morozov,
+7(903)3144226; nikola_535@mail.ru

Наталья Михайловна Красникова,
89274298559; эл. почта: knm0104@mail.ru

Natalia M. Krasnikova,
+7(927)4298559; knm0104@mail.ru

Игорь Викторович Боровских,
+7(843)5104734; эл. почта:
borigor83@gmail.com

Igor V. Borovskikh,
+7(843)5104734; borigor83@gmail.com

© Морозов Н.М., Красникова Н.М., Боровских И.В., 2015