

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-95-99

УДК 625.768.6

## Оптимизация пропиточного состава для защиты бетонных покрытий автомобильных дорог

Канд. техн. наук М. К. Пшембаев<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. Я. Н. Ковалев<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** Недостатки дорожных асфальтобетонных покрытий хорошо известны специалистам-дорожникам. Они главным образом обусловлены низким модулем упругости асфальтобетона, а также быстрым старением основного компонента асфальтобетона – битума. Как следствие этого явления – сравнительно низкая долговечность покрытия, необходимость его частого ремонта. В известной степени цементобетонные покрытия существенно превосходят по данному показателю асфальтобетонные, в чем убеждает опыт эксплуатации дорог Германии, США и других стран. Правильно подобранный состав бетона, общее соблюдение технологии укладки бетонной смеси, всеобъемлющий контроль качества производства работ, достаточная квалификация инженерно-технического персонала обеспечивают длительную бездефектную работу дорожного цементобетонного покрытия. Однако нарушения при производстве работ или в процессе эксплуатации, особенно в жестких условиях замораживания–оттаивания, насыщения–высушивания, при воздействии солей-антиобледенителей приводят к появлению дефектов покрытия, снижению его долговечности. Есть два направления расчетной долговечности покрытия. Во-первых, это первичная защита – создание бетона с минимально возможным на данных компонентах смеси водоцементным отношением, что обеспечивает получение бетона с минимальной пористостью и соответственно с максимальной долговечностью. Во-вторых, вторичная защита, обеспечивающая повышение сопротивляемости уже готового бетона покрытия внешним агрессивным воздействиям. В этом случае на фоне иных способов достаточно перспективной выглядит пропитка поверхности бетонного покрытия гидрофобизирующим и структуроукрепляющим веществом. Состав такого пропитывающего вещества должен содержать несколько компонентов, в первую очередь гидрофобизатор, препятствующий проникновению жидкости в тело бетона, и тонкодисперсный кремнезем (в частности, золь кремнезема), обеспечивающий снижение пористости поверхностных слоев бетона за счет взаимодействия со свободным гидроксидом кальция. Проблема оптимизации пропиточного состава и посвящена данная работа.

**Ключевые слова:** долговечность, дорожный бетон, структура, пропиточный состав, гидрофобизатор, золь кремнезема

**Для цитирования:** Пшембаев, М. К. Оптимизация пропиточного состава для защиты бетонных покрытий автомобильных дорог / М. К. Пшембаев, Я. Н. Ковалев // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 2. С. 95–99. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-95-99

## Optimization of Impregnating Composition for Protection of Concrete Pavement of Highways

М. К. Pshembaev<sup>1)</sup>, Ya. N. Kovalev<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Disadvantages of road asphaltic concrete pavements are well known for highway engineers. They mainly arise from low elasticity modulus of asphaltic concrete and rapid aging of the main asphaltic concrete component that is bitumen. As a consequence of this phenomenon there are a relatively low pavement durability and necessity of its frequent repair. It is fairly known that cement-concrete pavements significantly surpass asphaltic concrete pavements according to above mentioned index and this fact is proved by road operational experience in Germany, the United States and other countries. Work execution, sufficient qualification of engineers ensure long defect-free operation of road asphaltic concrete pavement.

### Адрес для переписки

Ковалев Ярослав Никитич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 150,  
220114, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 265-97-28  
ftk75@bntu.by

### Address for correspondence

Kovalev Yaroslav N.  
Belarusian National Technical University  
150 Nezavisimosty Ave.,  
220114, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 265-97-28  
ftk75@bntu.by

However any violations while executing works or during operational period, especially under harsh conditions of freezing and thawing, saturation–drying, exposure to deicer salt lead to occurrence of defects, reduction of its durability. There are two directions for calculation of the pavement durability. Firstly, it is a primary protection which makes it possible to create concrete with minimum possible water cement ratio for the mix components that permits to obtain concrete with minimum porosity and consequently with maximum durability. Secondly, there is a secondary protection that ensures better resistance of finished concrete pavement to external aggressive actions. In this case impregnation of concrete pavement surface with hydrophobic and structural strengthening substance looks rather prospective in contrast to other methods. Composition of such impregnating substance must contain some components: primarily that is water-repelling agent which prevents penetration of fluid into the concrete body, and then finely dispersed silica, in particular silica sol which ensures reduction in porosity of surface concrete layers due to interaction with free calcium hydroxide. The present paper is devoted to the problem pertaining to optimization of impregnating composition.

**Keywords:** durability, road concrete, structure, impregnating composition, water-repelling agent, silica sol

**For citation:** Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N. (2018) Optimization of Impregnating Composition for Protection of Concrete Pavement of Highways. *Science and Technique*. 17 (2), 95–99. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-2-95-99 (in Russian)

## Введение

В связи с тем, что дорожный бетон представляет собой пористый композиционный материал, возникает необходимость уменьшения или кольматации в нем части пор, что определяет его коррозионную стойкость. С этой целью поверхностный слой дорожного бетонного покрытия подвергают пропитке различными органическими и неорганическими соединениями. В качестве органических соединений используют полимерные материалы на основе полиуретановых, эпоксидных и акриловых смол [1].

Пример использования неорганических композиций – применение в качестве пропитки водных растворов соединений, приводящих к образованию в порах бетона труднорастворимых фосфатов, фторидов, силикатов и других веществ [2].

## Пропиточный состав

С целью снижения водопоглощения бетона следует считать целесообразным использование промышленных гидрофобизаторов на основе кремнийорганических соединений [3]. Представляют также интерес композиционные составы пропиток на основе гидрофобизатора и веществ, образующих в порах бетона труднорастворимые соединения, которые кольматируют эти поры.

Как известно, продуктами затвердевшего бетона являются гидросиликаты, гидроалюминаты и гидроалюмоферриты кальция. Кроме того, в результате гидролиза клинкерных материалов цемента образуется гидроксид кальция, использование которого в композиции с пропиточным составом может привести к образованию дополнительного количества гидросиликатов кальция. В качестве такой добавки в пропиточный состав может быть введен золь

кремнезема, что вызывает дальнейшее увеличение прочности и долговечности бетона [4].

Вторичные гидросиликаты кальция, образующиеся в процессе взаимодействия золя кремнезема и гидроксида кальция, кольматируют поры бетона и упрочняют его поверхностный слой за счет образования дополнительной твердой фазы, родственной первичным гидросиликатам кальция, образующимся при твердении цемента.

В качестве исходных материалов для получения пропиточного состава использовали: ТЭОС – тетраэтоксисилан (ТУ 6-09-3687–79); Софлексил-60 (ТУ 2229-008-42942526–2001) – водный раствор гидратированного метилсиликоната калия с массовой долей основного вещества 58–63 %, pH = 14; Софлексил-защиту (ТУ 222-025-42942526–2001) – раствор олигометилгидросилоксана в органическом растворителе.

Кремнезоль получали двумя способами. Первый заключался в катионировании раствора натриевого жидкого стекла, а второй – в использовании метода титрования разбавленного жидкого стекла уксусной кислотой [5].

## Планирование эксперимента

С целью изучения вышеупомянутых факторов и оптимизации пропиточного состава для дорожных покрытий был выполнен комплекс исследований с использованием математического планирования эксперимента [6]. В качестве критериев оценки долговечности цементобетонного покрытия выбраны такие физико-механические свойства бетона, как прочность на сжатие, водопоглощение и истираемость. Прочность бетона на сжатие интегрально характеризует способность бетона противостоять внешней агрессии. В технологии бетона именно

этот параметр связывают с деформативными свойствами бетона, его плотностью, проницаемостью для агрессивных флюидов. Водопоглощение бетона прямо связано с его капиллярной пористостью, а следовательно, с проницаемостью и глубиной пропитки материала уплотняющим раствором. А истираемость бетона определяет твердость образующейся на поверхности бетона уплотненной «корочки», увеличивающей долговечность покрытия.

На основании предварительных опытов были выбраны опорные исходные данные:

– оптимальное соотношение компонентов водного пропиточного раствора: гидрофобизатор : золя кремнезема : вода = 1:1:10;

– концентрация гидрофобизатора принята 60 %;

– концентрация золя кремнезема принята 20 %;

– оптимальное соотношение по сухому веществу: 0,6:0,2:10.

Исходный бетон, предназначенный для пропитки, имел следующие физико-механические параметры: прочность на сжатие 45,3 МПа, на изгиб 8,83 МПа, водопоглощение 1,5 %, истираемость 0,133 г/см<sup>2</sup>. Пропиточный состав наносили распылением на поверхность образцов; расход состава – 0,2–0,3 л/м<sup>2</sup>.

Для выявления оптимума пропиточного состава долю гидрофобизатора (влияющий фактор  $x_1$ ) принимали в пределах от 0 до 1,2, а долю золя кремнезема (влияющий фактор  $x_2$ ) – от 0 до 0,4. Условия опытов для оптимизации пропиточных составов приведены в табл. 1.

В процессе эксперимента исследовали не изменение абсолютных величин прочности бетона на сжатие, водопоглощения и истираемости, а относительные (в %), в которых для бетона без пропиточного состава они взяты за 100 %.

Таблица 1

Интервалы варьирования факторов  
Spacings for variation of factors

Код	Значение кода	Значение фактора	
		$x_1$	$x_2$
Основной уровень	0	0,6	0,2
Интервал варьирования	$x_i$	0,6	0,2
Верхний уровень	+	1,2	0,4
Нижний уровень	–	0	0

Матрица планирования и полученные результаты представлены в табл. 2.

Получаемые уравнения регрессии в общем виде выглядели так:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2. \quad (1)$$

После обработки результатов экспериментов были получены адекватные полиномиальные математические модели второго порядка, описывающие изменение относительной прочности, водопоглощения и истираемости бетона в зависимости от принятых переменных факторов.

Полученные модели после исключения незначимых коэффициентов записываются в виде следующих уравнений регрессии:

– для относительной прочности бетона, %:

$$f_{\text{отн}} = 114,2 + 1,2x_1 + 3,9x_2 - 1,1x_1^2 - 8,4x_2^2 + 0,8x_1x_2; \quad (2)$$

Таблица 2

План эксперимента (двухфакторный второго порядка) и полученные результаты

Plan of experiment plan (two-factor, second order) and obtained results

№ п/п	План				Относительное свойство бетона (без пропитки 100 %)		
	в кодах		в значениях		Прочность	Водопоглощение	Истираемость
	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$			
1	1	1	1,2	0,4	110,8	36,4	64,7
2	–1	1	0	0,4	106,8	90,6	62,1
3	1	–1	1,2	0	101,4	61,6	92,1
4	–1	–1	0	0	100,0	100,0	100,0
5	1	0	1,2	0,2	114,3	35,0	70,8
6	–1	0	0	0,2	111,9	81,2	73,6
7	0	1	0,6	0,4	109,7	46,2	61,5
8	0	–1	0,6	0	101,9	63,4	94,3
9	0	0	0,6	0,2	114,0	40,8	70,3
10	0	0	0,6	0,2	115,2	40,2	72,4
11	0	0	0,6	0,2	113,5	39,7	69,7

– для относительного водопоглощения бетона, %:

$$W_{\text{отн}} = 40,4 - 23,1x_1 - 8,6x_2 + 17,5x_1^2 + 14,2x_2^2 - 4,0x_1x_2; \quad (3)$$

– для относительной истираемости (относительной прочности) бетона, %:

$$I_{\text{отн}} = 70,7 - 1,4x_1 - 16,4x_2 + 7,3x_2^2 + 2,7x_1x_2. \quad (4)$$

Результаты выполненных расчетов и проверка статистической значимости по полученным математическим моделям подтвердили, что приведенные выше уравнения регрессии пригодны для описания этих моделей (табл. 3)

Таблица 3

**Проверка пригодности уравнений**  
**Check of equation applicability**

Параметр	Уравнение		
	(2)	(3)	(4)
Число значимых коэффициентов	5	6	6
Число степеней свободы в нулевой точке	2	2	2
Число степеней свободы для уравнения	4	3	3
Дисперсия в нулевой точке	0,763	0,303	2,010
Дисперсия адекватности	1,035	0,273	1,396
Расчетное значение критерия Фишера	1,356	1,111	1,439
Табличное значение критерия Фишера	19,246	19,164	19,164

### Анализ полученных результатов

Графическая интерпретация полученных результатов в виде объемных моделей представлена на рис. 1–3.

В соответствии с уравнением (2) и рис. 1 на увеличение прочности бетона наибольшее влияние оказывает содержание золя кремнезема (коэффициенты  $b_2$  и  $b_{22}$  равны соответственно 3,9 и 8,4). Максимальный прирост прочности бетона достигнут при содержании золя 0,2. С увеличением содержания золя от 0 до 0,2 возрастает количество гидроксида кальция, вступившего в реакцию с высокодисперсным кремнеземом с образованием плотных водонерастворимых минералов, что приводит к росту прочности бетона [7]. При дальнейшем увеличении количества золя возрастает вязкость пропиточного состава, соответственно падает глубина пропитки покрытия, что обуславливает снижение прочности бетона на сжатие. В то же время влияние гидрофобизатора незначительное (коэффициенты  $b_1$  и  $b_{11}$  рав-

ны соответственно 1,2 и 1,1), т. е. содержание гидрофобизатора на изменение прочности бетона практически не сказывается. В целом оптимальное содержание гидрофобизатора и золя кремнезема составляет соответственно около 0,6 и 0,2.

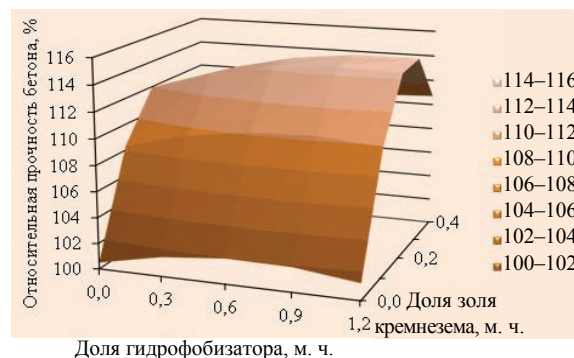


Рис. 1. Влияние содержания гидрофобизатора и золя кремнезема на относительную прочность бетона

Fig. 1. Influence of water-repellent agent and silica sol content on relative concrete strength

Обратная картина наблюдается при оценке влияния компонентов пропиточного состава на водопоглощение бетона (уравнение (3) и рис. 2). На величину водопоглощения содержание золя кремнезема практически не влияет, и это естественно, поскольку несколько уплотненная поверхностная «корочка» на кинетику проникновения воды не может влиять. Основное влияние на снижение водопоглощения оказывает содержание гидрофобизатора, причем его оптимальное количество – более 0,9.

Снижение истираемости бетона в основном определяется содержанием золя кремнезема, причем, чем больше количество микрокремнезема, тем эффект выше. Влияние гидрофобизатора сравнительно ничтожно [8–10].

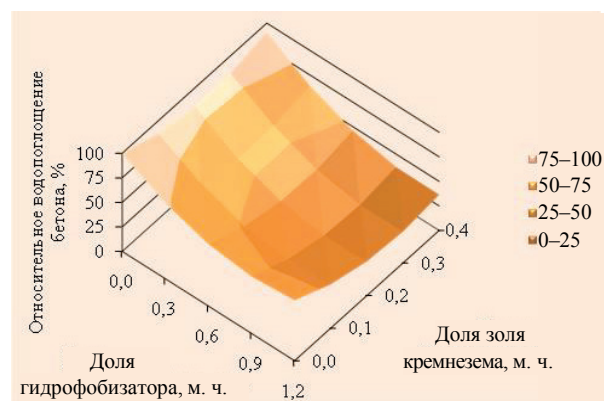


Рис. 2. Влияние содержания гидрофобизатора и золя кремнезема на относительное водопоглощение бетона

Fig. 2. Influence of water-repellent agent and silica sol content on relative concrete water absorption

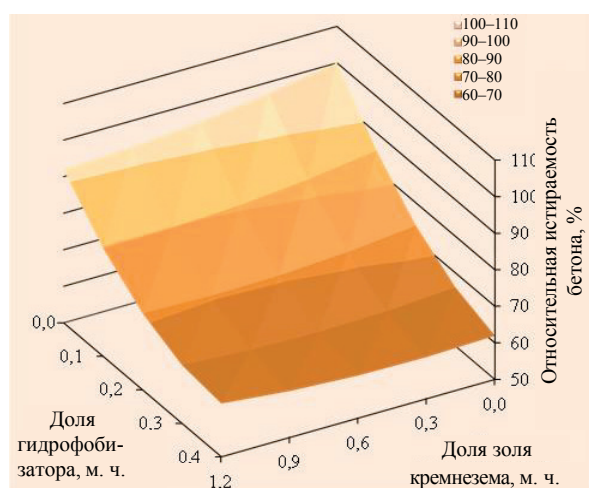


Рис. 3. Влияние содержания гидрофобизатора и золя кремнезема на относительную истираемость бетона

Fig. 3. Influence of water-repellent agent and silica sol content on relative concrete wearing properties

### ВЫВОД

Анализ активного эксперимента, интерпретация полученных адекватных полиномиальных моделей позволили выявить оптимальное соотношение компонентов пропиточного состава для получения максимального эффекта по росту прочности бетона на сжатие и истираемости, а также снижению водопоглощения: содержание гидрофобизатора и золя кремнезема соответственно 0,6 и 0,2.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лайдобон, Ч. С. Поверхностная модификация бетона высоковязкими составами / Ч. С. Лайдобон. Иркутск, 2005. 290 с.
2. Ершова, С. Г. Обеспечение эффективной гидрофобной защиты неорганических строительных материалов / С. Г. Ершова. Новосибирск, 2006. 174 с.
3. Пашченко, А. А. Кремнийорганические защитные покрытия / А. А. Пашченко, М. Г. Воронков. Киев: Техника, 1969. 251 с.
4. Баженов, Ю. М. Исследование наномодифицированного мелкозернистого бетона / Ю. М. Баженов, Н. П. Лукутцова, Е. Г. Матвеева // Вестник МГСУ. 2010. Т. 2, № 4. С. 415–418.
5. Соловьева, В. Я. Новые добавки полупункционального действия, улучшающие деформативные характеристики бетона / В. Я. Соловьева, Т. В. Смирнова, И. В. Степанова // Бетон и железобетон: тез. докл. II Междунар. науч.-практ. конф. Ростов на-Д., 2002. С. 312–322.
6. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В. А. Вознесенский [и др.]. Киев: Будивельник, 1989. 240 с.

7. Бунин, М. В. Структура и механические свойства дорожных цементных бетонов / М. В. Бунин, И. М. Грушко, А. Г. Ильин // Структура и механические свойства цементных бетонов. Харьков: Харьк. ун-т, 1968. 199 с.
8. Шестоперов, С. В. Долговечность бетона транспортных сооружений / С. В. Шестоперов. М.: Транспорт, 1966. 500 с.
9. Дубинин, М. М. Пористая структура и свойства материалов / М. М. Дубинин // RILEM-JUPAC: междунар. симпозиум. Прага, 1973. С. 56–63.
10. Вершинина, О. С. Применение кремнийорганических соединений в строительстве / О. С. Вершинина. М., 1989. 62 с.

Поступила 28.11.2017

Подписана в печать 15.02.2018

Опубликована онлайн 30.03.2018

### REFERENCES

1. Laydobon Ch. S. (2005) *Surface Modification of Concrete while Using High-Viscosity Compositions*. Irkutsk. 290 (in Russian).
2. Ershova S. G. (2006) *Provision of Efficient Water-Repelling Protection for Non-Organic Construction Materials*. Novosibirsk. 174 (in Russian).
3. Pashchenko A. A., Voronkov M. G. (1969) *Organic-Silicon Protection Coatings*. Kiev, Tekhnika Publ. 251 (in Russian).
4. Bazhenov Yu. M., Lukutsova N. P., Matveeva E. G. (2010) Investigations on Nano-Modified Fine Grain Concrete. *Vestnik MGSU* [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering], 2 (4), 415–418 (in Russian).
5. Solovyova V. Ya., Smirnova T. V., Stepanova I. V. (2002) New Semi-Functional Additives Improving Stress-Related Concrete Characteristics. *Beton i Zhelezobeton v Tret'em Tysyacheletii: Materialy Vtoroi Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Concrete and Reinforced Concrete in the Third Millennium: Materials of the Second International Scientific-Practical Conf.]. Rostov-on-Don, Rostov State University of Civil Engineering, 312–322 (in Russian).
6. Voznesensky V. A., Lyashenko T. V., Ivanov Ya. P., Nikolov I. I. (1989) *Electronic Computers and Optimization of Composite Materials*. Kiev, Budivelnik Publ. 240 (in Russian).
7. Bunine M. V., Grushko I. M., Ilyin A. G. (1968) *Structure and Mechanical Properties of Road Cement Concrete*. Kharkov, Kharkov University 199 (in Russian).
8. Shestoperov S. V. (1966) *Concrete Longevity in Transport Works*. Moscow, Transport. 500 (in Russian).
9. Dubinine M. M. (1973) Porous Structure and Material Properties. *RILEM-JUPAC: International Symposium*. Prague, 56–63.
10. Vershinina O. S. (1989) *Application of Organic-Silicon Compounds in Construction*. Moscow. 62 (in Russian).

Received: 28.11.2017

Accepted: 15.02.2018

Published online: 30.03.2018