

НАУКА и ТЕХНИКА

Международный
научно-технический журнал



**Science
& Technique** 6/2015
International
Science & Technique Journal

Серия 2. Строительство

Series 2. Civil and Industrial Engineering

Издается с января 2002 года

Published since January 2002

Периодичность издания – один раз в два месяца

Publication frequency – bi-monthly

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Founder

Belarussian National
Technical University

Главный редактор

Борис Михайлович Хрусталеv

Editor-in-Chief

Boris M. Khroustalev

Редакционная коллегия

А. С. Калиниченко (*заместитель главного редактора*),
В. В. Бабицкий, В. Г. Баштовой, А. В. Белый, В. П. Бойков,
С. В. Босаков, Ю. В. Василевич, О. Г. Девойно,
К. В. Доброго, П. И. Дячек, М. З. Згуровский (*Украина*),
Р. Б. Ивуть, М. Г. Киселев, В. М. Константинов, Я. Н. Ковалев,
В. В. Козловский, Н. В. Кулешов, С. Н. Леонович,
С. А. Маскевич, Э. И. Михневич,
Нгуен Тху Нга (*Вьетнам*), М. Опеляк (*Польша*),
О. Г. Пенязьков, Г. А. Потаев, О. П. Реут, Ф. А. Романюк,
И. И. Сергей, В. Л. Соломахо, С. А. Чижик, А. Н. Чичко,
В. К. Шелег, Й. Эберхардштайнер (*Австрия*),
Б. А. Якимович (*Россия*)

Editorial Board

A. S. Kalinichenko (*Deputy Editor-in-Chief*),
V. V. Babitsky, V. G. Bashtovoi, A. V. Belyi, V. P. Boikov,
S. V. Bosakov, Yu. V. Vasilevich, O. G. Devoyno,
K. V. Dobrego, P. I. Diachek, M. Z. Zgurovsky (*Ukraine*),
R. B. Ivut, M. G. Kiselev, V. M. Konstantinov, Ya. N. Kovalev,
V. V. Kozlovsky, N. V. Kuleshov, S. N. Leonovich,
S. A. Maskevich, E. I. Mikhnevich,
Nguyen Thuy Nga (*Vietnam*), M. Opelyak (*Poland*),
O. G. Peniazkov, G. A. Potaev, O. P. Reut, F. A. Romaniuk,
I. I. Sergei, V. L. Solomakho, S. A. Chizhik, A. N. Chichko,
V. K. Sheleg, J. Eberhardsteiner (*Austria*),
B. A. Yakimovich (*Russia*)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Хрусталеv Б. М., Яглов В. Н., Ковалев Я. Н., Романюк В. Н., Бурак Г. А., Меженцев А. А., Гуриненко Н. С. Наномодифицированный бетон	3
Гущин С. В., Бабицкий В. В. Экспресс-метод оценки эффективности противоморозных добавок	9
Юхневский П. И., Широкий Г. Т. Об идентификации пластифицирующих добавок для бетонов	19
Леонович С. Н., Свиридов Д. В., Щукин Г. Л., Радюкевич П. И., Беланович А. Л., Савенко В. П., Карпушенков С. А. Сухая смесь для получения пенобетона	24
Осипов С. Н., Поздняков Д. А. Об оценке физического износа упругопластических элементов зданий	30
Земляков Г. В. Моделирование процесса тепловой обработки бетона монолитных конструкций	37
Вавилов П. В., Кравченко С. Е. Добавки в холодные асфальтобетоны из эмульсионно-минеральных смесей	44

Khroustalev B. M., Yaglov V. N., Kovalev Ya. N., Romaniuk V. N., Burak G. A., Mezhentsev A. A., Gurinenko N. S. Nanomodified Concrete	3
Gushchin S. V., Babitsky V. V. Rapid Test Method for Evaluation of Antifreeze Additive Efficiency	9
Yukhnevskiy P. I., Schirokij G. T. On Identification of Concrete Plasticizing Additives	19
Leonovich S. N., Sviridov D. V., Shchukin G. L., Radyukevich P. I., Belanovich A. L., Savenko V. P., Karpushenkov S. A. Dry Mix for Obtaining Foam Concrete	24
Osipov S. N., Pozdniakov D. A. On Assessment of Dilapidation in Elasto-Plastic Elements of Buildings	30
Zemlyakov G. V. Modeling of Concrete Thermal Treatment in Cast-in-Situ Structures	37
Vavilov P. V., Kravchenko S. E. Additives for Cold Asphalt-Concrete Made from Emulsion-Mineral Mixes	44

Осиновская В. А. Прогнозирование долговечности асфальтобетонных покрытий на основе уровней их вибронагруженности	49	Osinovskaya V. A. Forecasting of Durability of Asphalt-Concrete Pavement on the Basis of their Vibration Loading Rate	49
Леонович С. Н., Передков И. И. Технология устройства облегченных пустотообразователями железобетонных плит перекрытия с предварительным напряжением арматуры в построечных условиях	54	Leonovich S. N., Peredkov I. I. Technology for Installation of Reinforced Concrete Floor Slabs Lightened by Core Drivers with Preliminary Reinforcement Stress	54
Бондаренко С. Н., Чулкин П. В., Рагойша Г. А., Коликов А. О., Бондаренко А. С. Исследование процесса твердения цементобетонного конгломерата методом импедансной спектроскопии	63	Bandarenka S. N., Chulkin P. V., Ragoisha G. A., Kolikov A. O., Bandarenka A. S. Investigation of Cement Concrete Conglomerate Solidification Process by Impedance Spectroscopy Method	63
Солодкая М. Г., Тур А. Н., Ковалев Я. Н. Особенности повышения эффективности функционирования автодорожного комплекса Республики Беларусь	74	Solodkaya M. G., Tur A. N., Kovalev Ya. N. Specific Features of Higher Efficiency in Functioning of Road-Transport Complex in the Republic of Belarus	74
Ляхевич Г. Д., Ляхевич А. Г., Агабаба Ранграз Алиреза Наджиб, Далидовская А. А. Технология и эффективность использования торфяной золы в мастике для гидроизоляции мостовых и тоннельных конструкций	79	Lyahevich G. D., Lyahevich A. G., Agababa Rangraz Alireza Najib, Dalidovskaya A. A. Technologies and Efficient Use of Peat Ash Mastics for Waterproofing of Bridge and Tunnel Structures	79
ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «НАУКА И ТЕХНИКА» В 2015 Г.		LIST OF PAPERS PUBLISHED IN “SCIENCE & TECHNIQUE” JOURNAL IN 2015	
Тематический указатель	86	Thematic Index	86

Ответственный секретарь редакции

В. Н. Гурьянчик

Executive Secretary of Editorial Staff

V. N. Guryanchyk

Адрес редакции

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, корп. 2, комн. 327
220013, г. Минск, Республика Беларусь

Тел. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

Address

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Avenue, 65, Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus

Тел. +375 17 292-65-14

E-mail: sat@bntu.by

Перерегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 декабря 2011 г.
Регистрационный номер 285

С 2002 г. издание выходило под названием «Вестник БНТУ»

ISSN 2227-1031. Подписные индексы 00662, 006622

Подписано в печать 17.11.2015. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз. Дата выхода в свет . Заказ № .

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

УДК 691.17

НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫЙ БЕТОН

*Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ХРУСТАЛЕВ Б. М.¹⁾,
докт. хим. наук, проф. ЯГЛОВ В. Н.¹⁾, доктора техн. наук, профессора КОВАЛЕВ Я. Н.¹⁾, РОМАНИУК В. Н.¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты БУРАК Г. А.¹⁾, МЕЖЕНЦЕВ А. А.¹⁾, инж. ГУРИНЕНКО Н. С.¹⁾*

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

E-mail: rvn_bntu@mail.ru

Одним из важнейших направлений в строительном материаловедении является разработка бетона нового поколения – сверхплотного и высокопрочного, ультрапористого, высокотеплоэффективного, особо коррозионно-стойкого и др. Выбор такого направления обусловлен экстремальными эксплуатационными воздействиями на бетон, а именно: постоянно возрастающей на него нагрузкой и разнообразной динамикой таких нагрузок; необходимостью эксплуатации бетонных изделий в широком температурном диапазоне и при подверженности различным химико-физическим воздействиям. Бетон нового поколения представляет собой высокотехнологичные смеси с добавками, приобретает и сохраняет требуемые свойства при твердении и службе в любых эксплуатационных условиях. Отличительной особенностью бетона нового поколения является многокомпонентность, что подразумевает использование разнообразных минеральных дисперсных компонентов, двух- и трехфракционного мелкого и крупного заполнителей, комплексных химических добавок, комбинаций полимерной и стальной арматуры. Проектный уровень прочности и эксплуатационных свойств бетона нового поколения достигается качественным подбором состава, выбором технологии изготовления, уходом за бетоном, доведением качества бетонных изделий до требуемого уровня технического состояния на стадии эксплуатации. Вместе с тем, для получения высокотехнологичного бетона необходимо направленное формирование его структуры. Наряду с традиционными способами регулирования структуры бетона нового поколения перспективной также является его модификация наноразмерными частицами кремнезема, при введении которых в минеральную матрицу вяжущего происходит ее структурирование. В результате получают наномодифицированные материалы с совершенно новыми свойствами. Основная проблема создания наномодифицированных бетонов – равномерное распределение наноматериала в объеме цементной матрицы, что особенно важно в случаях добавления модификатора в микроколичестве. Для решения этой проблемы необходима дополнительная среда, образующая в композите непрерывную фазу. Эту функцию может выполнять жидкая или дисперсная фаза.

Ключевые слова: наномодифицированный бетон, нанодисперсный кремнезем, плотность бетона.

Табл. 8. Библиогр.: 10 назв.

NANOMODIFIED CONCRETE

*KHROUSTALEV B. M.¹⁾, YAGLOV V. N.¹⁾, KOVALEV Ya. N.¹⁾, ROMANIUK V. N.¹⁾,
BURAK G. A.¹⁾, MEZHENTSEV A. A.¹⁾, GURINENKO N. S.¹⁾*

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

One of the main directions in construction material science is the development of next generation concrete that is ultra-dense, high-strength, ultra-porous, high heat efficient, extra corrosion-resistant. Selection of such direction is caused by extreme operational impacts on the concrete, namely: continuously increasing load on the concrete and various dynamics of such loads; the necessity in operation of concrete products in a wide temperature range and their exposure to various chemical and physical effects. The next generation concrete represents high-tech concrete mixtures with additives that takes on and retain the required properties when hardening and being used under any operational conditions. A differential characteristic of the next generation concrete is its complexity that presumes usage of various mineral dispersed components, two- and three fractional fine and coarse aggregates, complex chemical additives, combinations of polymer and iron reinforcement. Design strength and performance properties level of the next generation concrete is achieved by high-quality selection of the composition, proper selection of manufacturing techniques, concrete curing, bringing the quality of concrete items to the required level of technical condition during the operational phase. However, directed formation of its structure is necessary in order to obtain high-tech concrete. Along with the traditional methods for regulation of the next generation concrete structure, modification of concrete while using silica nanoparticles is also considered as a perspective one because the concrete patterning occurs due to introduction of a binder in a mineral matrix. Due to this it is possible to obtain nano-modified materials with completely new properties. The main problem with the creation of nano-modified concrete is a uniform distribution of nano-

materials in the volume of the cement matrix which is particularly important in the cases of adding a modifier in micro-quantities. An additional environment is required in order to solve this problem and the environment will form a continuous phase in the composite. This function can be performed by liquid or dispersed phase.

Keywords: nano-modified concrete, nano-disperse silica, concrete density.

Tab. 8. Ref.: 10 titles.

В настоящее время существует несколько способов введения и равномерного распределения наноматериала:

- использование слабых растворов или суспензий для обработки поверхности объектов перед нанесением защитных пленочных покрытий;
- приготовление водной суспензии в гидродинамическом ультразвуковом диспергаторе и смешивание с основным материалом связующего с использованием стандартного оборудования;
- обработка поверхности высокодисперсного наполнителя перед его введением в композиционный материал;
- введение наноструктурированной добавки в бетонную смесь при совместном перемешивании [1–7].

В статье представлены результаты исследования влияния добавок нанодисперсного крем-

незема в виде порошка и золя на свойства цемента и бетона. Установлено, что добавка ультрадисперсного кремнезема повышает плотность, морозостойкость и прочностные показатели цемента и бетона для дорожного строительства. Используются следующие сырьевые материалы:

- цементы заводов Беларуси, характеристики которых приведены в табл. 1;
- ультрадисперсный порошок SiO_2 , свойства которого представлены в табл. 2;
- золь SiO_2 («Ковелос 20») (табл. 3);
- щебень фракции 5–10 мм из гранитных отсевов месторождения «Микашевичи» Республики Беларусь;
- песок, данные по которому представлены в табл. 4;
- суперпластификатор С-3.

Таблица 1

Характеристики цементов заводов Беларуси

Завод-изготовитель	Марка цемента	Активность цемента, МПа	Группа эффективности при пропаривании	Минералогический состав, %				Предел прочности на сжатие $K_{нт}$, МПа	Срок схватывания, мин	
				C_3S	C_3A	C_2S	C_4AG		Начало	Конец
1. ОАО «Красносельскстройматериалы»	ПЦ500-Д0	50,0	I	55	4,7	20	15	0,263	210	310
2. ОАО «Кричевцементношифер»	ПЦ500-Д0	48,6	I	54	5,0	21	16	0,280	183	255
3. ОАО «Белорусский цементный завод»	ПЦ500-Д0	49,5	I	58	6,5	18	13	0,275	225	335

Таблица 2

Свойства ультрадисперсного порошка SiO_2 35/05т

Внешний вид и цвет	Белый рыхлый порошок
Запах	Не выражен
Массовая доля диоксида кремния (в сухом остатке), %	98,0
Массовая доля воды, %	6,0
Массовая доля растворимого железа, %	0,1
Массовая доля сульфатов, %	1,8
Площадь удельной поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$	350,0
pH (5%-я водная суспензия)	6,1
Средний размер частиц, нм	20,0–30,0
Насыпная плотность при 20 °С, г/л	55,0

Таблица 3

Свойства золя SiO_2

Внешний вид	Опалесцирующая жидкость
Отношение к воде	Гидрофильна
Запах	Отсутствует
Массовая доля железа, %	Не более 0,1
Массовая доля диоксида кремния, %	Не менее 20
Массовая доля влаги, %	75–85
Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	1,120–1,140
pH водной суспензии	9–11

Таблица 4

Показатели качества песка

Показатель	Значение показателя
Модуль крупности	2,71
Полный остаток на сите № 063, % мас.	51,00
Содержание пылевидных, иглистых и глинистых частиц, % мас.	0,25
Содержание глины в комках, % мас.	0
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг	72,00
Насыпная плотность, кг/м ³	1580,00
Влажность, % мас.	3,80

Влияние ультрадисперсного кремнезема на плотность и прочностные свойства цемента в процессе его твердения представлены в табл. 5. Из данных таблицы следует, что добавка ультрадисперсного SiO₂ к цементу марки ПЦ500-Д0

повышает его плотность и прочность на сжатие за счет взаимодействия выделяющегося при гидролизе гидроксида кальция с ультрадисперсным SiO₂ с образованием гидросиликатов кальция. Причем наибольшее значение прочности на сжатие наблюдается при добавке ультрадисперсного SiO₂ в количестве 0,2 % от массы цемента.

Влияние модификаторов на прочностные характеристики цементно-песчаных смесей отражено в табл. 6. Из данных таблицы следует, что повышение прочности на сжатие при введении модификаторов составляет 16–18 %. Очевидно, что при высоком водовяжущем отношении (0,425) использование наномодификаторов дает прирост прочности только за счет образования вторичного количества гидросиликатов и гидроалюминатов кальция. Дефекты же структуры бетона существенно не изменяются.

Таблица 5

Кинетика изменения плотности и прочности на сжатие образцов ПЦ500-Д0 с добавкой ультрадисперсного модификатора SiO₂

Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа
Без добавки, K _{нт} = 0,2475		0,05 % SiO ₂ , K _{нт} = 0,2475		0,1 % SiO ₂ , K _{нт} = 0,2475		0,2 % SiO ₂ , K _{нт} = 0,2475		0,3 % SiO ₂ , K _{нт} = 0,2475	
Одни сутки									
2203	23,6	2205	29,4	2204	29,4	2203	27,9	2205	28,04
Трое суток									
2204	43,4	2208	47,6	2208	43,8	2210	52,8	2208	50,7
Семь суток									
2212	53,8	2214	66,3	2213	59,1	2215	68,7	2210	61,1
14 суток									
2220	61,8	2220	68,0	2221	65,7	2228	74,3	2209	65,3
28 суток									
2240	77,9	2238	79,2	2245	79,2	2266	92,1	2242	82,3

Таблица 6

Влияние модификаторов на прочность песчано-цементной смеси [5]

Цемент, г	Песок, г	H ₂ O, г	C-3, г	Золь SiO ₂ , г	SiO ₂ – ультрадисперсный, г	R _{сж} , МПа	R _{изг} , МПа
400	1200	170	2	–	–	50,0	4,7
400	1200	170	2	12	–	53,9	7,5
400	1200	170	2	12 + 0,6 г K ₄ [Fe(CN) ₄]	–	59,0	9,0
400	1200	170	2	–	0,8	58,1	7,9
400	1200	170	2	–	–	58,0	7,5

Оценку эффективности действия комплексной добавки на основе золя гидроксида железа проводили при получении бетона следующего состава (кг): цемент – 600; песок – 610; щебень – 914; вода – 276; водоцементное отношение – 0,46 [4]. Оценку качества получаемого бетона выполняли на образцах-кубах размерами 10×10×10 см.

Основная идея использования золя как добавки в бетон состоит в его применении для создания дополнительного структурного элемента в бетонной смеси. Дополнительный структурный элемент, представляющий собой наночастицу оксида кремния, со временем в результате реакции с Ca(OH)₂ переходит в гидросиликат кальция и способствует сокращению количества пор от размера 1 нм и более (происходит заполнение пор частицами золя и продуктами его взаимодействия). Предполагается, что вводимые новые структурные элементы будут нивелировать отрицательные явления, связанные с повышенными расходами цемента [8–10].

При автоклавировании действие золь-добавки аналогично действию песка, диспергированного до удельной поверхности, сопоставимой с удельной поверхностью коллоидных частиц, которая может быть достигнута только конденсационным методом. Если это справедливо, то следствием воздействия золя должны быть: снижение усадки, рост прочности, долговечности и улучшение деформативных характеристик. Эффективность действия золя H₄SiO₄ оценивали по прочности на сжатие образцов размерами 2×2×2 см, изготовленных из цементной пасты при использовании портландцемента ПЦ400-Д20 [5]. Твердение образцов осуществлялось в нормальных условиях при температуре (20 ± 2) °С. Золь H₄SiO₄ получали путем катионирования раствора натриевого жидкого стекла при разбавлении 1:20. Исследо-

вания показали, что оптимальное количество золя H₄SiO₄ составляет 0,6 % от массы цемента. Это количество обеспечивает повышение прочности на сжатие в раннем возрасте (3 сут.) на 28 % и в проектном возрасте (28 сут.) на 18 % по сравнению с контрольным образцом [5].

С целью повышения эффективности действия золя H₄SiO₄ осуществляли его модификацию электролитами с разным зарядом аниона, такими как K₄[Fe(CN)₆], K₃[Fe(CN)₆], Na₃PO₄, Na₂SO₄. Установлено, что наиболее благоприятное сочетание золя ортокремниевой кислоты наблюдается при введении калия железистосинеродистого K₄[Fe(CN)₆], при оптимальном количестве 25 % мас. от массы золя. Обнаружено, что в присутствии K₄[Fe(CN)₆] золь отличается повышенной устойчивостью во времени, так как анион добавленной соли имеет максимальный отрицательный заряд. Данную зольсодержащую композицию назвали Hardness-M. Использование ее в оптимальном количестве, равном 0,75 % от массы цемента, обеспечивает повышение прочности на сжатие образцов из цементной пасты, твердеющих в нормальных условиях в раннем возрасте (3 сут.) на 85 % и в проектном возрасте (28 сут.) – на 46 % [5].

Влияние композиции Hardness-M на прочностные и деформативные характеристики тяжелого бетона оценивали при максимальных расходах цемента 500–600 кг/м³. Для этого в опытах использовали портландцемент ПЦ400-Д20, гранитную крошку размером фракции 1,25–2,5 мм и песок для строительных работ с M_{кр} = 2,1. Твердение бетона осуществлялось в нормальных условиях при t = (20 ± 2) °С и влажности 95 %. Испытания проводили по стандартным методикам и для каждого вида испытаний изготовляли образцы в соответствии с требованиями ГОСТ. Полученные результаты представлены в табл. 7 [5].

Таблица 7

Физико-механические характеристики бетона с зольсодержащей композицией [5]

Номер серии	Расход материала на 1 м ³						В/Ц	Прочность, МПа				Усадка, мм/м, в возрасте 90 сут.	Водопоглощение, %	Морозостойкость, цикл	Водопроницаемость, атм.
	Ц, кг	П, кг	Гранитная крошка с размером частиц 1,25–2,5 мм, кг	Добавка, %	Вода, л	на сжатие		при изгибе							
						Время, сут.									
						3		28	3	28					
1	500	610	1100	–	190	0,38	31	43	4,9	5,3	3,7	5,7	250	8	
2		620	1105	0,75	175	0,35	51	62	9,2	10,0	0,3	2,5	600	14	
3	600	566	1006	–	216	0,36	39	55	6,2	6,6	3,8	5,5	300	10	
4		580	1028	0,75	192	0,32	63	76	11,5	13,6	0,3	2,5	700	16	

Анализ данных табл. 7 показывает, что зольсодержащая композиция Hardness-M отличается пластифицирующим эффектом, а бетон, модифицированный добавкой, имеет повышенную прочность на сжатие и при изгибе, причем во времени прочность при изгибе увеличивается и достигает значения 13,6 МПа, что отличает модифицированный бетон от контрольного образца. Это свидетельствует о формировании структуры с меньшим внутренним напряжением. Водопоглощение активированного бетона не превышает 2,5 %, водонепроницаемость увеличивается в 2,5 раза, усадка бетона составляет 0,3 мм/м. Полученные данные свидетельствуют о том, что зольсодержащая композиция Hardness-M способствует формированию более плотной структуры. Общая пористость активированного образца уменьшается более чем на 40 %, при этом размер всех пор модифицированного искусственного камня уменьшился, преобладали преимущественно капиллярные поры с размером 0,03 мм. Указанные выше положительные результаты позволили рассмотреть возможность создания высокопрочного бетона при использовании комплексной зольсодержащей композиции [5].

Зависимость прочности активированного бетона от расхода цемента исследовали на образцах-кубах размерами 10×10×10 см, твердение которых осуществлялось в нормальных условиях в течение 28 сут.

Экспериментально установлено, что бетон достигает максимального значения прочности 106 МПа при расходе цемента 950 кг/м. Кинетика изменения прочности бетона нормального твердения представлена в табл. 8.

Анализ полученных данных показывает, что применение зольсодержащей композиции

позволяет уменьшить В/Ц на 0,11. При этом структурная вязкость бетонной смеси, определяемая по всплытию шарика на приборе Десова, имеет одинаковое значение с контрольным образцом. Это свидетельствует о том, что используемая добавка обладает пластифицирующим эффектом действия. Установлено, что бетон имеет более высокое значение прочности на сжатие в течение всего анализируемого периода, равного 60 сут., прочность активированного бетона превышает прочность контрольного образца в раннем возрасте (3 сут.) на 63 %, а в проектном (28 сут.) – на 39 %, что обеспечивает получение высокопрочного бетона класса В80 [5].

ВЫВОД

При твердении и гидратации минералов портландцементного клинкера образуется значительное количество (25–30 % от массы цемента) гидроксида кальция, который не обладает вяжущими свойствами. Однако гидроксид кальция можно связать в гидросиликаты кальция вторичной формации, используя ультрадисперсный порошок SiO_2 или его коллоидный раствор (золь). При этом ультрадисперсный кремнезем может быть как природного происхождения, так и получен искусственно с использованием золь-гель технологии. Исследования влияния нанодисперсного кремнезема на свойства бетона показали, что плотность последнего увеличивается, истираемость и усадка снижаются, марка по морозостойкости и водонепроницаемости повышается. Все это благоприятно сказывается на эксплуатационных свойствах дорожного бетона.

Таблица 8

Кинетика изменения прочности бетона нормального твердения [5]

№ серии	Расход материала на 1 м ³ , кг					В/Ц	ОК, см	Вязкость, пз	Прочность на сжатие, МПа/% к контр.				
	Ц, кг	П, кг	Щ, кг	Добавка, %	Вода, л				Возраст, сут.				
									3	7	28	45	60
1	950	174	987	–	295	0,31	1,0	306,7	38/100	47/100	76/100	68	62
2	950	181	1036	H_4SiO_4 , 0,6	237	0,25	1,0	320,9	48/126	57/121	83/109	90	94
3	950	184	1049	H_4SiO_4 + $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, 0,75	223	0,23	1,0	306,9	62/163	74/157	106/139	113	118

ЛИТЕРАТУРА

1. Холманских, Н. А. Исследование гомогенности многокомпонентных строительных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 484 / Н. А. Холманских. – М., 1971. – 16 с.
2. Елисеева, Н. Н. Пенобетоны неавтоклавного твердения на основе добавок наноразмера: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Н. Н. Елисеева. – СПб., 2010. – 24 с.
3. Естемесов, З. А. Нанопроцессы при гидратации и твердении портландцемента. Ч. 1, 2 / З. А. Естемесов, А. В. Барвинов, М. З. Естемесов // Технологии бетонов. – 2009. – № 5. – С. 68–70; 2009. – № 6. – С. 56–57.
4. Старчуков, Д. С. Оценка эффективности действия комплексной добавки на основе гидроксида железа для получения высокопрочного бетона / Д. С. Старчуков // Бетон и железобетон. – 2012. – № 5. – С. 8–9.
5. Степанова, И. В. Разработка и применение новых зольсодержащих добавок для повышения качества бетона разной плотности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / И. В. Степанова. – СПб., 2004. – 23 с.
6. Матвеева, Е. Г. Повышение эффективности бетона добавкой нанодispersного кремнезема: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Е. Г. Матвеева. – Белгород, 2011. – 24 с.
7. Нелюбова, В. В. Повышение эффективности производства силикатных автоклавных материалов с применением нанодispersного модификатора / В. В. Нелюбова // Строительные материалы. – 2008. – № 9. – С. 89–92.
8. Лукутцова, Н. П. Наномодифицирующие добавки в бетон / Н. П. Лукутцова // Строительные материалы. – 2010. – № 9. – С. 101–104.
9. Артамонова, О. В. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов / О. В. Артамонова, Б. М. Чернышев // Строительные материалы. – 2013. – № 9. – С. 82–90.
10. Особенности фазообразования в системе CaO–SiO₂–H₂O в присутствии наноструктурированного модификатора / И. В. Жерновский [и др.] // Строительные материалы. – 2009. – № 11. – С. 100–102.

Поступила 25.05.2015

REFERENCES

1. Kholmanskikh, N. A. (1971) *Issledovanie Gomogenosti Mnogokomponentnykh Stroitelnykh Materialov. Avtoref.*

dis. kand. tekhn. nauk [Investigations on Homogeneity of Multi-Component Construction Materials. Abstract of Ph.D. Thesis in Engineering Science]. Moscow. 16 p. (in Russian).

2. Eliseeva, N. N. (2010) *Penobetonny Neavtoklavnykh Tverdeniia na Osnove Dobavok Nanorazmera. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Foam Concrete of Non-Autoclaved Curing on the Basis of Nanosize Additives. Abstract of Ph.D. Thesis in Engineering Science]. Saint-Petersburg. 24 p. (in Russian).

3. Estemesov, Z. A., Barvinov, A. V., & Estemesov, M. Z. (2009) Nano-Processes During Hydration and Portland Cement Curing. Part. 1, 2. *Tekhnologii Betonov* [Concrete Technology], 5, 68–70; 6, 56–57 (in Russian).

4. Starchukov, D. S. (2012) Assessment of Efficient Action of Complex Additive on the Basis of Ferrum Hydroxide for Obtaining High-Performance Concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 5, 8–9 (in Russian).

5. Stepanova, I. V. (2004) *Razrabotka i Primenenie Novykh Zolsoderzhashchikh Dobavok dlia Povysheniia Kachestva Betona Raznoi Plotnosti. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Development and Application of New Sol-Containing Additives for Quality Improvement of Concrete Having Various Density. Abstract of Ph.D. Thesis in Engineering Science]. Saint-Petersburg. 23 p. (in Russian).

6. Matveeva, E. G. (2011) *Povyshenie Effektivnosti Betona Dobavkoi Nanodispersnogo Kremnezema. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Improvement of Concrete Efficiency while Using Nanodispersed Silica Additive. Abstract of Ph.D. Thesis in Engineering Science]. Belgorod. 24 p. (in Russian).

7. Neliubova, V. V. (2008) Improvement of Efficiency in Production of Silicate Autoclave Materials while Applying Nanodisperse Modifier. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], 9, 89–92 (in Russian).

8. Lukutsova, N. P. (2010) Nanomodified Additives for Concrete. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], 9, 101–104 (in Russian).

9. Artamonova, O. V., & Tchernyshov, B. M. (2013) Concepts and Fundamentals of Technologies for Nanomodification of Construction Composite Structures. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], 9, 82–90 (in Russian).

10. Zhernovskii, I. V., Neliubova, V. V., Cherevatova, A. V., & Stokova, V. V. (2009) Specific Features of Phase-Formation in CaO–SiO₂–H₂O System with the Presence of Nanostructured Modifier. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], 11, 100–102 (in Russian).

Received 25.05.2015

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОМОРОЗНЫХ ДОБАВОК

Асп. ГУЩИН С. В.¹⁾, докт. техн. наук, проф. БАБИЦКИЙ В. В.¹⁾

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

E-mail: vvbabitski@mail.ru

Применение химических добавок в практике ведения бетонных работ при отрицательных температурах – удобный и экономичный метод. Гамма используемых противоморозных добавок весьма широка. Рекламируются многочисленные новые добавки, характеристики которых практически не изучены. Оценка эффективности противоморозных добавок, к сожалению, длительна и не дает исчерпывающей информации о процессах структурообразования бетона, в связи с чем разработка оперативной и доступной для строительных организаций методики настоятельно необходима. Исследованы процессы замерзания водных растворов противоморозных добавок и твердения цементного теста с ними. Предложена методика определения температуры замерзания водных растворов химических добавок различного назначения. На примере добавок нитрата кальция и формиата натрия установлена идентичность температуры замерзания водного раствора химической добавки и цементного теста с равной концентрацией добавки в поровой жидкости теста. Показана возможность оценки эффективности действия противоморозных добавок по кинетике изменения температуры цементного теста с добавками посредством его последовательного замораживания и размораживания. Предложена методика оперативной оценки области применения химических добавок для бетонирования изделий при отрицательных температурах. Методика не требует дефицитного и дорогостоящего испытательного оборудования, применима в рядовых строительных организациях, доступна работникам низкой квалификации. Показана возможность разработки оригинальной методики проектирования состава бетона, основывающейся на оперативных определениях эффективности одинарных и комплексных противоморозных добавок.

Ключевые слова: бетон, противоморозные добавки, эффективность, методика оценки.

Ил. 8. Табл. 4. Библиогр.: 20 назв.

RAPID TEST METHOD FOR EVALUATION OF ANTIFREEZE ADDITIVE EFFICIENCY

GUSHCHIN S. V.¹⁾, BABITSKY V. V.¹⁾

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

Usage of chemical additives while executing concrete works at negative temperatures is considered as a convenient and economical method. Range of the used antifreeze additives is rather wide. A great number of new additives are advertised but their characteristics have not been practically studied. Evaluation of the antifreeze additive efficiency is unfortunately rather long process and it does not provide comprehensive data on concrete structure formation processes. Due to this development of rapid and comprehensive methodology for construction companies is urgently required. Freezing processes of antifreeze additive aqueous solutions and hardening of cement paste with them have been investigated in the paper. The paper proposes a methodology for determination of freezing point for aqueous solutions of chemical additives of various applications. Identity of freezing point for a chemical additive aqueous solution and cement paste with an equal concentration of the additive in the paste pore fluid has been determined while taking calcium nitrate and sodium formate additives as an example. The paper demonstrates the possibility to evaluate efficiency of antifreeze additive action on the basis of kinetics in temperature changes of the cement paste with additives by its consecutive freezing and defrosting. A methodology for operational evaluation in the field of chemical additive application for concreting items at negative temperatures has been offered in the paper. The methodology does not require deficient and expensive test-equipment. It can be applied at ordinary construction companies and it is comprehensible for personnel of low-qualification. The paper shows the possibility to develop an original methodology for designing concrete structure which is based on operating efficiency determinations for single and integrated antifreeze additives.

Keywords: concrete, antifreeze additives, efficiency, evaluation methodology.

Fig. 8. Tab. 4. Ref.: 20 titles.

Введение. Применение химических добавок в технологии производства бетонных работ при низких температурах представляет собой один из наиболее широко распространенных мето-

дов зимнего бетонирования [1–3]. «Введение противоморозных добавок – технологически наиболее простой, удобный и экономически выгодный способ зимнего бетонирования. Этот

способ в 1,2–1,4 раза экономичнее, чем способ паропрогрева и бетонирования с предшествующим ограждением сооружения и его утеплением изнутри и в 1,3–1,5 раза экономичнее электропрогрева и электрообогрева. Безобогревное зимнее бетонирование благодаря применению противоморозных добавок позволяет экономить тепло- и электроэнергию при более гибкой технологии проведения работ» [4].

Общеизвестно, что твердение цементных бетонов замедляется при снижении температуры и практически прекращается при замерзании жидкой фазы. Поэтому для обеспечения твердения в зимних условиях необходимо предотвращать замерзание воды в бетоне, что может быть достигнуто либо сохранением положительной температуры бетона в период твердения до набора им критической прочности, либо снижением температуры замерзания жидкой фазы путем введения в состав бетона различных химических добавок.

В принципе, основное назначение противоморозных добавок – снизить температуру замерзания бетонной смеси (антифризное действие), т. е. обеспечить возможность ведения бетонных работ при отрицательных температурах. В свою очередь, температура замерзания бетонной смеси определяется температурой замерзания поровой жидкости (косвенно – температурой замерзания водного раствора добавки, используемой для затворения сухих компонентов бетона). Характеристики таких добавок представлены как в нормативных документах, например в ТКП 45-5.03-21-2006 «Бетонные работы при отрицательных температурах воздуха. Правила производства», так и в многочисленных литературных источниках [1–8].

При этом гамма рекомендуемых добавок с каждым годом растет – в различных проспектах, статьях, на совещаниях и симпозиумах рекламируются многочисленные химические добавки – как действительно эффективные, так и относящиеся к разряду «чудесных». Закономерен вопрос: как строительные организации могут выделить и использовать именно те добавки, какие им нужны, основываясь на экспериментальной проверке их свойств, а не рекламе? Для этого существуют стандартизированные методики оценки эффективности противомороз-

ных добавок, представленные в ГОСТ 28084–89 «Жидкости охлаждающие низкотемпературные. Общие технические условия» и ГОСТ 30459–96 «Добавки для бетонов. Методы определения эффективности».

Антифризное действие противоморозных добавок. Рассмотрим технику проведения эксперимента, позволяющую практически в любой строительной организации оперативно, за несколько суток, определить эффективность противоморозной добавки, которая складывается из возможности снижения температуры замораживания и влияния данной добавки (или комплекса добавок) на кинетику структурообразования цементного теста (цементного камня), бетонной смеси (бетона). Что касается определения температуры замерзания водного раствора противоморозной добавки (или иной, поскольку данная величина является характеристикой, определяющей область применения добавки), то существует методика определения данной температуры, описанная в ГОСТ 28084–89. Она предполагает, что испытуемая жидкость помещается в холодильник и охлаждается при постоянном перемешивании до появления в ней кристаллов льда. Этот момент определяется визуально, когда невооруженным взглядом отмечается в жидкости помутнение как признак начала кристаллизации. Температура, при которой заметили помутнение, фиксируется как температура начала кристаллизации. Вполне работоспособна и обратная методика, согласно которой раствор добавки вначале замораживают, а затем (опять-таки визуально) уже при положительной температуре фиксируют температуру оттаивания раствора. Естественно, описанная техника определения температуры замерзания несовершенна, поскольку подвержена влиянию человеческого фактора и может приводить к значительным погрешностям в результатах.

Авторы статьи предлагают методику, основанную на известном эффекте неизменности температуры при достижении температуры замерзания жидкости (в рассматриваемом случае – химической добавки). То есть на кривой «время – температура жидкости» наблюдается четко выраженная «ступенька», что связано с образованием новых кристаллов при замерзании жидкости, контактирующей с охлаждающей средой и, естественно, отбором теплоты. Общая темпе-

ратура замерзающей жидкости при этом не изменяется. Такая схема замораживания характерна для жидкостей с наличием центров кристаллизации. В противном случае наблюдается некоторое кратковременное снижение температуры с последующим ростом до температуры кристаллизации и опять-таки образованием «ступеньки» (горизонтального участка). В этом случае при оценке температуры замораживания кратковременный спад температуры следует игнорировать. Установка для исследования кинетики замораживания достаточно проста.

Датчик температуры (DS 1921) помещается в алюминиевый пенал, закрытый теплоизолирующей пробкой, а пенал, в свою очередь, – в поплавок, плавающий на поверхности исследуемой жидкости. Емкость с раствором добавки помещается в морозильную камеру (в рассматриваемом случае обычный бытовой морозильник, обеспечивающий температуру среды минус 18 °С) и замораживается при температуре, заведомо ниже температуры замораживания жидкости. Датчик DS 1921 периодически (в соответствии с заданной частотой) записывает температуру среды. Затем полученная информация с помощью компьютера выдается в виде таблицы, строится график изменения температуры и фиксируется момент замораживания добавки. Примеры таких графиков применительно к сравнительно малоизученным противоморозным добавкам – нитрату кальция (НК) и формиату натрия (ФН) – приведены на рис. 1, 2. Наличие описанного выше незначительного снижения температуры можно заметить, например, на рис. 1, 2 для высоких концентраций НК и ФН (30 и 14 % соответственно) через 3,5–4,0 ч после начала замораживания.

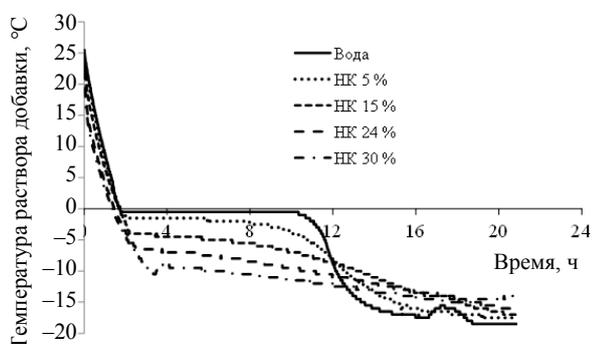


Рис. 1. Изменение температуры раствора добавки НК в процессе замораживания

Полученные численные значения «ступенек», соответствующих температурам замораживания растворов, приведены в табл. 1.

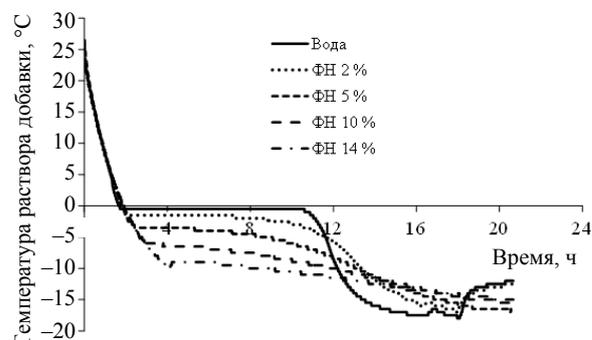


Рис. 2. Изменение температуры раствора добавки ФН в процессе замораживания

Таблица 1

Температура замораживания растворов добавок НК и ФН

Концентрация раствора, %	Температура замораживания раствора, °С	
	НК	ФН
0	-0,5	-0,5
2	–	-1,5
5	-1,5	-3,5
10	–	-6,0
14	–	-9,0
15	-4,0	–
24	-6,5	–
30	-9,0	–

Наблюдается достаточно устойчивая зависимость температуры замораживания растворов НК ($t_{зНК}$) и ФН ($t_{зФН}$) от их концентраций ($C_{НК}$) и ($C_{ФН}$):

$$t_{зНК} = -0,0037C_{НК}^2 - 0,1679C_{НК} - 0,5396; \quad (1)$$

$$t_{зФН} = -0,0064C_{ФН}^2 - 0,5078C_{ФН} - 0,534. \quad (2)$$

По антифризному действию добавка формиата натрия более предпочтительна, поскольку при равных концентрациях температура замораживания водного раствора ФН существенно выше, чем НК.

Согласно описанной методике проведены эксперименты с общеизвестными добавками, часть которых представлена в табл. 2. В этой же таблице даны сравнительные характеристики по температуре замораживания противоморозных добавок, взятые из ТКП 45-5.03-21-2006, а также дублируемые в практически неизменном виде другими нормативными документами и литературными источниками.

Как видно из табл. 2, для ХК наблюдается практически полная сходимость. Имеются некоторые малосущественные отличия для ХН.

Таблица 2
Температура замерзания растворов добавок хлорида натрия (ХН), хлорида кальция (ХК) и нитрита натрия (НН)

Концентрация раствора добавки, %	Температура замерзания раствора, °С, по методике	
	ТКП 45-5.03-21-2006	предлагаемой
ХН		
2	-1,2	-2,0
8	-5,2	-6,0
14	-10,1	-11,0
19	-15,3	-16,5
–	-21,1	-23,0
ХК		
4	-2,0	-2,5
10	-5,7	-6,0
14	-9,5	-9,5
19	-15,9	-15,5
НН		
4	-1,8	-2,0
12	-5,8	-5,0
19	-10,0	-8,5
25	-15,7	-11,5

Что касается НН, достаточно широко используемого в практике зимнего бетонирования, то в области высоких концентраций наблюдается значительное отклонение. Следует отметить наличие разницы в определениях температуры замерзания и для иных добавок, не приведенных в табл. 2. Если принять, что предлагаемая методика более точна (а это еще требует доскональной проверки), чем описанная в ГОСТ 28084–89, то для некоторых добавок следует корректировать области их применения в зимнем бетонировании.

Структурообразование цементного теста при положительной температуре. Однако назначение противоморозных добавок не исчерпывается функцией снижения температуры замерзания ее водного раствора. Существуют вещества, весьма эффективные с этой точки зрения, но не всегда перспективные для модификации бетона, поскольку, в частности, снижают отдельные характеристики бетона. Достаточно убедительный пример – добавка поташа (K_2CO_3), снижающая при концентрации 40 % температуру замерзания водного раствора до

минус 36,5 °С, но существенно уменьшающая морозостойкость бетона (важнейшая характеристика, определяющая его долговечность) [9]. Желательно, чтобы противоморозные добавки одновременно являлись и ускорителями твердения бетона, что обеспечивает сокращение сроков достижения критической прочности бетона. Еще более эффективны противоморозные добавки с дополнительным пластифицирующим эффектом (а также многокомпонентные), позволяющие снизить водоцементное отношение бетонной смеси и интенсифицировать процессы структурообразования цементного теста и соответствующее нарастание прочности бетона.

Для оценки влияния химических добавок на процессы структурообразования бетона инженеры-технологи используют разнообразные методы [1, 2, 6, 7, 10], основной из которых – исследование кинетики изменения прочности цементного камня или бетона. При всей привлекательности этого метода (главное – он эталонный) он позволяет получить результаты лишь в достаточно длительные сроки твердения. Например, при оценке эффективности противоморозной добавки сроки испытания 28 сут. Следовательно, надо прибегать к методам, относящимся к оперативным и при этом учитывающим все разнообразие влияющих факторов: вид и дозировку химической добавки, вид и расход вяжущего, водоцементное отношение и пр. В свете изложенных требований привлекательным выглядит метод оценки влияния добавок по кинетике тепловыделения цемента, получивший достаточно широкое развитие [11–16]. Однако имеется и препятствие к широкому использованию данного метода – для его реализации необходимо специализированное оборудование (калориметры), доступное лишь для солидных научных организаций.

В БНТУ предложена упрощенная методика, основывающаяся на использовании датчиков DS 1921 и позволяющая оперативно изучить влияние химических и минеральных добавок на процессы структурообразования цементных теста и камня, доступная для реализации практически в любой лаборатории и даже в полевых условиях [17–20]. Методика заключается в следующем. Приготавливают цементное тесто с различным начальным водосодержанием и добавками. Тесто укладывают в формы, представляющие собой пластмассовые стаканчики

диаметром 70 мм и высотой 80 мм, на высоту 70 мм, затем уплотняют в зависимости от его консистенции встряхиванием, постукиванием или кратковременным виброуплотнением на встряхивающем столике. На поверхность цементного теста устанавливают запрограммированные датчики температуры, стаканчики закрывают крышками и помещают в гнезда термокассеты, выполненной из пенопласта и обеспечивающей минимальную эмиссию теплоты. Запись изменения температуры производят в течение суток. Затем строят кривые изменения температуры теста и температуры относительно начальной, скорости изменения температуры, а также тепловыделения цемента, позволяющие комплексно оценить влияние исследуемых добавок на процессы тепловыделения цемента, а следовательно, его гидратации, структурообразования цементного теста и цементного камня, а косвенно – бетона заданного состава.

Анализ графиков варьирования температуры цементного теста относительно начальной показывает, что температура в течение некоторого промежутка времени (подъем до 5–7 °С) практически не изменяется – это так называемый индукционный период ($\tau_{ин}$), определяющий в основном начало схватывания цемента. Затем температура увеличивается в течение некоторого времени (τ_{tmax}) до экстремума (t_{max}), что позволяет рассчитать скорость подъема температуры (v_t). Эти три численных параметра характеризуют интенсивность структурообразования цементного теста, поскольку процесс изменения температуры определяется кинетикой гидратации цемента. И наконец, разбиение всего процесса твердения на равные промежутки времени и суммирование произведений времени и соответствующей температуры для каждого периода позволяют рассчитать удельное тепловыделение цемента ($q_{ц}$), в частности в конце эксперимента, то есть в 24 ч ($q_{ц24}$). Этот параметр характеризует уже влияние исследуемых добавок на свойства цементного камня (бетона) в более поздние сроки твердения.

В соответствии с данной методикой проведены исследования различных противоморозных добавок. Примеры изменения температуры и полученные результаты обработки кривых для добавок НК и ФН представлены на рис. 3, 4 и в табл. 3.

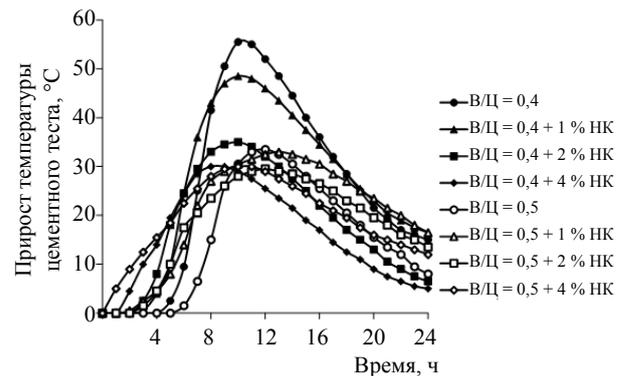


Рис. 3. Кинетика изменения температуры цементного теста с добавкой НК

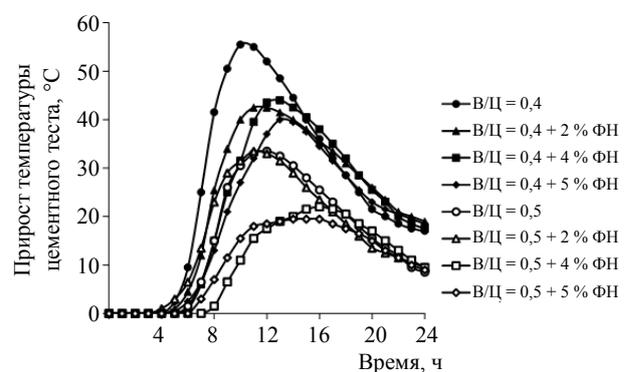


Рис. 4. Кинетика изменения температуры цементного теста с добавкой ФН

Таблица 3

Параметры твердеющего цементного теста

Добавка, %	$\tau_{ин}$, ч	τ_{tmax} , ч	t_{max} , °С	v_t , °С/ч	$q_{ц24}$, кДж/кг
НК, В/Ц = 0,4					
–	5,5	10,0	55,0	10,9	237
1	4,5	10,0	48,5	7,7	238
2	3,5	10,0	35,0	4,5	211
4	2,5	8,0	30,0	4,4	199
НК, В/Ц = 0,5					
–	7,0	12,0	33,5	5,5	219
1	4,5	13,0	33,0	3,2	247
2	4,5	12,0	29,5	3,1	236
4	1,5	10,0	30	2,8	242
ФН, В/Ц = 0,4					
–	5,5	10,0	55,5	10,9	237
2	6,5	11,0	42,5	8,1	228
4	7,0	13,0	44,0	6,3	224
5	7,0	13,0	40,0	5,7	216
ФН, В/Ц = 0,5					
–	7,0	12,0	33,5	5,5	219
2	6,0	11,0	33,5	5,5	223
4	9,0	16,0	22,0	2,3	177
5	8,0	14,0	19,5	2,3	178

Добавка НК с ростом содержания снижает продолжительность индукционного периода вне зависимости от водоцементного отношения, т. е. способствует ускорению схватывания цемента, и это соответствует приводимым в разных источниках данным. Однако снижение как максимальной температуры, так и скорости подъема температуры показывает, что отнесение этой добавки к классу эффективных ускорителей твердения (что в последнее время сопровождается интенсивной рекламой) сомнительно. Естественно, данный вывод основывается только на результатах испытания добавки применительно к использованному цементу и в дальнейшем требует дополнительных исследований по кинетике изменения прочностных характеристик цементного камня.

Что касается добавки ФН, то она по сумме критериев не может быть отнесена ни к ускорителям схватывания, ни к ускорителям твердения. С ростом дозировки добавки интенсивность структурообразования цементного теста последовательно снижается.

В целом для обеих добавок заметна тенденция интенсификации процессов твердения с уменьшением водоцементного отношения.

Структурообразование цементного теста, последовательно замораживаемого и размораживаемого. Описанная методика, применяемая при твердении цементного теста при положительных температурах, была несколько видоизменена для изучения антифризного действия противоморозных добавок и структурообразования бетона. В соответствии с ней после приготовления цементного теста и укладки его в стаканчик пенал с датчиком температуры (как в описанной выше методике определения температуры замораживания раствора добавки) углубляли в цементное тесто. Стаканчик помещали в морозильную камеру (бытовой морозильник), охлажденную до температуры минус 18 °С. Затем примерно через сутки стаканчики с цементным тестом извлекали из морозильника, устанавливали в термостат (кассета, выполненная из пенопласта с гнездами для установки стаканчиков [17]) и выдерживали в лабораторных условиях при положительной температуре. В случае необходимости оценки иных свойств цементного камня параллельно изготавливали и испытывали образцы аналогичного состава, но без контроля изменения

температуры теста. По окончании испытаний образцы-цилиндры извлекали из стаканчиков и испытывали, например на сжатие.

Примеры полученных данных по кинетике изменения температуры цементного теста с водоцементным отношением 0,3 и добавками НК (1, 2 и 4 % от массы цемента) и ФН (2, 4 и 5 % от массы цемента) представлены на рис. 5, 6. В опытах использовали цемент ОАО «Красносельскстройматериалы» марки 500 плотностью 3100 кг/м³.

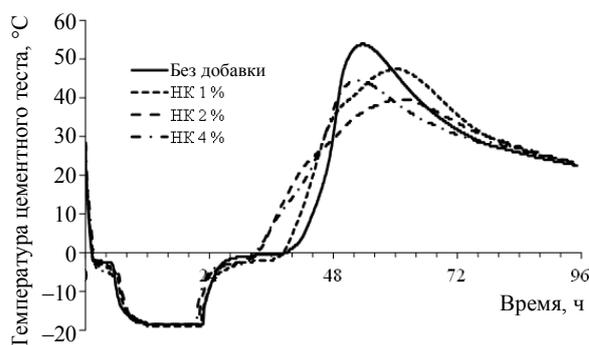


Рис. 5. Изменение температуры цементного теста с добавкой НК в процессе замораживания при температуре минус 18 °С и последующего размораживания при температуре ±18 °С

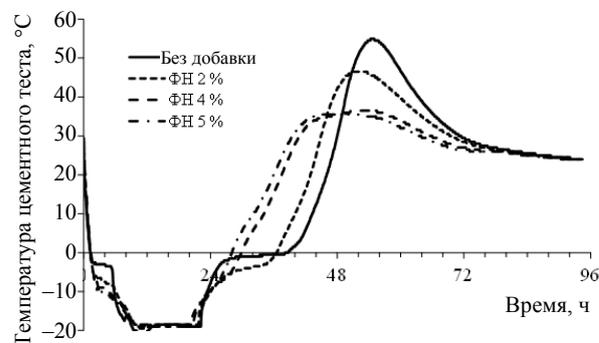


Рис. 6. Изменение температуры цементного теста с добавкой ФН в процессе замораживания при температуре минус 18 °С и последующего размораживания при температуре ±18 °С

На графиках фиксировали «ступеньки» как при замораживании теста, так и при его размораживании. Соответствующие значения температуры приведены в табл. 4. Следует отметить, что эти величины примерно идентичны. Поэтому температуру замерзания цементного теста можно фиксировать как в процессе его замораживания, так и размораживания в зависимости от продолжительности горизонтально-го участка, что повышает точность измерений.

Таблица 4

**Характеристики цементного теста
с противоморозными добавками НК и ФН**

Параметр	Без добав-ки	НК			ФН		
		1,0	2,0	4,0	2,0	4,0	5,0
Дозировка добавки, % от массы цемента	0	1,0	2,0	4,0	2,0	4,0	5,0
Содержание добавки в 1 м ³ цементного теста, кг	0	16,1	32,1	64,2	32,1	64,2	80,3
Концентрация раствора добавки в цементном тесте, %	0	3,2	6,3	11,8	6,3	11,8	14,3
Температура заморозания раствора добавки, °С	-0,5	-2,5	-3,5	-4,5	-4,0	-7,4	-9,1
Температура заморозания цементного теста, °С	-2,0	-2,5	-3,5	-4,5	-6	-9	-10
Температура оттаивания цементного теста, °С	-1,5	-2,5	-4,0	-4,5	-4	-8	-9

Полученные результаты позволили сопоставить температуры замораживания цементного теста, т. е. поровой жидкости в нем, и водного раствора добавки равной концентрации. Для этого необходимо рассчитать концентрацию добавок НК и ФН в поровой жидкости цементного теста и затем температуру их заморозания. Знание водоцементного отношения позволяет, произведя элементарные расчеты, получить искомые данные.

Расход цемента на 1 м³ цементного теста

$$\rho_{\text{ц}} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{V}{\rho_{\text{в}} \cdot W/C}}, \text{ кг}, \quad (3)$$

где V/C – водоцементное отношение (в рассматриваемом случае $V/C = 0,3$); $\rho_{\text{ц}}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотность цемента и воды ($\rho_{\text{ц}} = 3100 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$).

Расход воды

$$V = \rho_{\text{ц}} \frac{V}{\rho_{\text{в}} \cdot W/C}. \quad (4)$$

Для исследуемого цементного теста с $V/C = 0,3$ расход цемента на 1 м³ цементного теста

составляет 1606 кг, а расход воды – 482 кг. Далее по содержанию противоморозных добавок и объему воды в цементном тесте рассчитывали концентрацию НК и ФН в поровой жидкости, а по формулам (1) и (2) – предполагаемую температуру заморозания их водных растворов (табл. 4).

Из полученных данных следует важный вывод: температура заморозания раствора противоморозной добавки примерно соответствует температуре заморозания (оттаивания) цементного теста. А это ставит под сомнение, во-первых, мнение о том, что температура заморозания бетона с противоморозной добавкой определенной концентрации ниже температуры заморозания водного раствора этой добавки и, во-вторых, методику оценки эффективности противоморозных добавок согласно ГОСТ 30459–96 «Добавки для бетонов. Методы определения эффективности».

В соответствии с СТБ 1112–98 «Добавки для бетонов. Общие технические условия» к противоморозным добавкам относятся такие вещества, которые обеспечивают твердение бетона при отрицательных температурах. Эффективность противоморозной добавки (по ГОСТ 30459–96) определяют по набору прочности бетона, твердевшего при отрицательной температуре. Подразделяются они на две группы. К I группе относятся те, в которых прочность бетона основного состава (с добавкой), твердевшего при температуре минус $(15 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 28 сут., составляет не менее 30 % от прочности бетона контрольного (без добавки) состава, твердевшего при температуре $(20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$. При этом в возрасте 28 сут. нормального твердения прочность бетона основного состава должна быть не менее 90 % прочности бетона контрольного состава. Для добавок II группы температура замораживания составляет не минус $(15 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$, а минус $(7 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$. Соответствие же прочностей бетона основного и контрольного составов такое же, как и для добавок I группы.

Расход компонентов бетона основного и контрольного составов идентичен: расход цемента составляет 350 кг/м^3 , а доля песка в смеси заполнителей – 0,4. Удобоукладываемость бетонной смеси должна соответствовать марке П1. Концентрацию раствора противоморозной добавки (A_n) следует рассчитывать по формуле

$$A_n = \frac{(100-i)A_k}{100-0,01A_k i}, \quad (5)$$

где A_k – концентрация водного раствора добавки, начало замерзания которого соответствует назначенной температуре испытания бетона, %; i – допускаемая расчетная льдистость бетона, % (принимают 45–60 % при температуре выдерживания бетона от минус (5–30) °С соответственно).

В соответствии с рассчитанными значениями приготавливают водные растворы исследуемой противоморозной добавки, которые используют для затворения сухих компонентов бетонной смеси. Дополнительно изготавливают еще серии контрольных образцов с измененными значениями A_n на ± 1 %.

Произведем расчеты. Предположим, испытывается противоморозная добавка ХН. Допустим, она относится к I группе, т. е. испытания необходимо проводить при температуре минус (15 ± 5) °С. Согласно данным, приведенным в табл. 2, концентрация раствора ХН (A_k) для этой температуры должна быть около 19 %. Приняв льдистость i изменяющейся от 45 до 60 %, получаем по (5) величины A_n от 11,4 до 8,6 %.

Предположим, что при указанных величинах A_n бетон замерзнет при температуре около минус 15 °С. Однако если основываться на полученных данных о соответствии температуры замерзания раствора добавки и цементного теста (следовательно, и бетонной смеси) с этой добавкой, то температура замерзания будет от минус (6,0–7,5) °С, а не минус 15 °С. Конечно, авторы далеки от утверждения о том, что методика испытаний эффективности противоморозных добавок в соответствии с ГОСТ 30459–96 требует немедленной корректировки, но, безусловно, необходима постановка дополнительных экспериментов для уточнения ее положений в свете получения информации о кинетике тепловых процессов при твердении бетона, а не только взаимного соответствия прочностных характеристик.

Вернемся к рис. 5, 6. Естественно, при температурах, ниже температуры замерзания цементного теста, процессы гидратации цемента прекращаются, поэтому эту часть графика как не несущую дополнительную информацию можно удалить (рис. 7, 8).

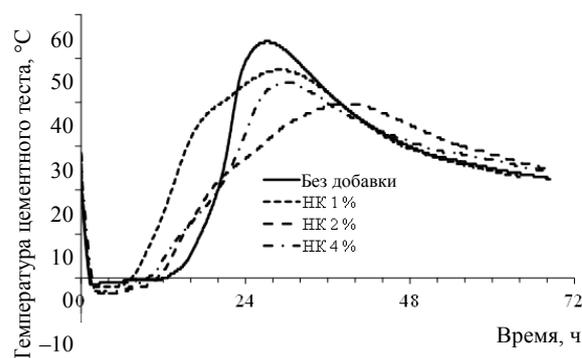


Рис. 7. Структурообразование цементного теста с добавкой НК при температурах, выше температуры замерзания

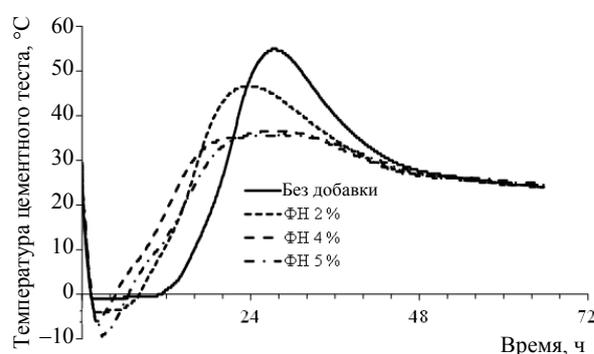


Рис. 8. Структурообразование цементного теста с добавкой ФН при температурах, выше температуры замерзания

Сравним рис. 3 и 7, 4 и 8 или сопоставим результаты, представленные на рис. 7, 8 с параметрами твердеющего теста (табл. 3). В принципе, несмотря на уменьшение водоцементного отношения до 0,3 (рис. 7, 8) в сравнении с 0,4 и 0,5 (табл. 3), тенденция изменения температуры цементного теста сохраняется. Для добавки НК характерно сокращение длительности индукционного периода с ростом дозировки, но для добавки ФН имеет место обратная картина. Для обеих добавок максимальная температура цементного теста присуща тесту без добавок, а с увеличением дозировки она уменьшается. В целом же можно отметить, что общие тенденции изменения температуры цементного теста при температурах, выше температуры замерзания, примерно соответствуют параметрам, полученным при испытаниях по отработанной методике. Это позволяет предложить экспресс-методику оценки эффективности противоморозных добавок методом калориметрии.

Предположим, необходимо рассчитать состав бетона, твердеющего при заданной отрицательной температуре. Инженер-технолог рассчитывает водоцементное отношение бетонной смеси, обеспечивающее заданные параметры бетона на имеющемся цементе, и соответствующее водоцементное отношение цементного теста. Далее выбираются (по наличию, дефицитности, цене и пр.) предполагаемые противоморозные добавки. Приготавливается несколько вариантов цементного теста с различными дозировками добавок. Устанавливаются датчики температуры. Затем по описанной методике цементное тесто замораживается в имеющейся в наличии морозильной камере и размораживается. Строятся графики изменения температуры. Определяются температура замораживания и параметры твердеющего теста при температуре, превышающей температуру замораживания. Выбирается добавка, отвечающая заданным требованиям. И наконец проектируется окончательный состав бетона. По мнению авторов, предлагаемая техника оценки эффективности противоморозных добавок оперативно учитывает требования к бетонной смеси по удобоукладываемости, заданные требования к бетону, особенности используемого вяжущего. При этом выбор добавки, особенно новой, не описанной в литературе, основывается не на рекламе (зачастую недобросовестной), а на конкретных экспериментальных результатах.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика определения температуры замерзания водных растворов химических добавок различного назначения, исключая влияние человеческого фактора и тем самым повышающая достоверность получаемых результатов.

2. Исследованы температуры замерзания широко используемых в практике зимнего строительства противоморозных добавок. Показано, что для раствора добавки нитрита натрия высокой концентрации установленная температура замерзания существенно выше, чем приведенная в литературных источниках.

3. На примере добавок нитрата кальция и формиата натрия выявлена идентичность температуры замерзания водного раствора химической добавки и цементного теста с равной концентрацией добавки в поровой жидкости теста. Показана возможность оценки антифризного

действия противоморозных добавок по кинетике изменения температуры цементного теста с добавками посредством его последовательно замораживания и размораживания.

4. Предложена методика оперативной оценки области применения химических добавок для бетонирования изделий при отрицательных температурах. Методика не требует дефицитного и дорогостоящего испытательного оборудования, применима в рядовых строительных организациях, доступна работникам низкой квалификации.

5. Открывается возможность разработки оригинальной методики проектирования состава бетона, основывающейся на оперативных определениях эффективности одинарных и комплексных противоморозных добавок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миронов, С. А. Теория и методы зимнего бетонирования / С. А. Миронов. – М.: Государственное изд-во строительной литературы, 1950. – 266 с.
2. Миронов, С. А. Бетоны, твердеющие на морозе / С. А. Миронов, А. В. Лагойда. – М.: Стройиздат, 1975. – 158 с.
3. Бессер, Я. Р. Методы зимнего бетонирования / Я. Р. Бессер. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 168.
4. Добавки в бетон: справ. пособие / В. С. Рамачандран [и др.]; под ред. В. С. Рамачандрана; пер с англ. Т. И. Розенберг и С. А. Болдырева; под ред. А. С. Болдырева и В. Б. Рагинова. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
5. Технология и методы зимнего монолитного бетонирования / Э. И. Батыновский [и др.]. – Минск: БНТУ, 2005. – 238 с.
6. Барабанщиков, Ю. Г. Исследование некоторых аспектов твердения бетона при отрицательных температурах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Ю. Г. Барабанщиков. – Л., 1980. – 16 с.
7. Лагойда, А. В. Зимнее бетонирование с использованием противоморозных добавок к бетону / А. В. Лагойда // Бетон и железобетон. – 1984. – № 9. – С. 23–26.
8. Гендин, В. Я. Области применения способов зимнего бетонирования / В. Я. Гендин, В. К. Кузьмин // Бетон и железобетон. – 1987. – № 5. – С. 12–13.
9. Грапп, А. А. Структура и морозостойкость бетонов с противоморозными добавками / А. А. Грапп, В. Б. Грапп, А. С. Каплан // Второй Междунар. симпозиум по зимнему бетонированию. – М.: Стройиздат, 1975. – С. 60–68.
10. Розенберг, Т. И. Исследование процессов твердения бетонов с комплексными добавками при температуре ниже 0 °С / Т. И. Розенберг, В. Б. Токарь, А. А. Мамедов // Второй Междунар. симпозиум по зимнему бетонированию. – М.: Стройиздат, 1975. – С. 152–163.
11. Огороков, С. Д. Тепловыделение бетона в условиях зимнего бетонирования / С. Д. Огороков, А. А. Парийский // Второй Междунар. симпозиум по зимнему бетонированию. – М.: Стройиздат, 1975. – С. 130–139.
12. Мчедлов-Петросян, О. П. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов / О. П. Мчедлов-

Петросян, А. В. Ушеров-Маршак, А. М. Урженко. – М.: Стройиздат, 1984. – 224 с.

13. Ушеров-Маршак, А. В. Оценка вклада экзотермии в энергетический баланс твердения вяжущих и бетонов / А. В. Ушеров-Маршак, Л. А. Першина, П. В. Кривенко // Бетон и железобетон. – 1997. – № 3. – С. 12–14.

14. Калориметрия как основа информационной технологии бетона новых поколений / А. Ушеров-Маршак [и др.] // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: сб. тр. VII Международ. науч.-метод. семинара. – Брест: БрГТУ, 2001. – С. 364–370.

15. Ушеров-Маршак, О. В. Калориметрия цементу і бетону: вибрані праці / О. В. Ушеров-Маршак // Відп. ред. В. П. Сопов. – Харьков: Факт, 2002. – 183 с.

16. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны: теория и практика / В. Г. Батраков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1998. – 768 с.

17. Биби́к, М. С. Оценка кинетики твердения цементного камня с использованием термодатчиков системы «Термохрон» / М. С. Биби́к, В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2010. – № 4 (31). – С. 23–26.

18. Бабицкий, В. В. Прогнозирование характеристик твердеющего тяжелого бетона / В. В. Бабицкий, С. Д. Семенюк, М. С. Биби́к // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне, 2009. – Вип. 18. – С. 3–12.

19. Биби́к, М. С. Определение основных периодов трапецидального режима тепловлажностной обработки бетона / М. С. Биби́к, В. В. Бабицкий, С. Д. Семенюк // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне, 2011. – Вип. 22. – С. 22–28.

20. Биби́к, М. С. Влияние минеральных добавок на тепловыделение цемента и оценка эффективности их применения / М. С. Биби́к // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наукових праць. – Рівне, 2014. – Вип. 28. – С. 13–22.

Поступила 03.09.2015

REFERENCES

1. Mironov, S. A. (1950) *Theory and Methods for Cold-weather Concreting*. Moscow, State Publishing House of Construction Literature. 266 p. (in Russian).

2. Mironov, S. A., & Lagoyda, A. V. (1975) *Concrete Curing in Freezing Temperatures*. Moscow, Stroyizdat. 158 p. (in Russian).

3. Besser, Ya. R. (1976) *Methods for Cold-Weather Concreting*. Moscow, Stroyizdat. 168 p. (in Russian).

4. Ramachandran, V. S., Feldman, R. F., Kollepari, M., Malkhotra, V. M., Dolch, V. L., Mekhta, P. K., & Ratinov, V. B. (1988) *Concrete Additives. Reference Manual*. Moscow, Stroyizdat. 575 p.

5. Batianovskiy, E. I., Golubev, N. M., Babitsky, V. V., & Markovskiy, M. F. (2005) *Technology and Methods for Cold-Weather Cast-in-Situ Concreting*. Minsk: BNTU. 238 p. (in Russian).

6. Barabanshchikov, Yu. G. (1980) *Issledovanie Nekotorykh Aspektov Tverdeniya Betona pri Otritsatelnykh Temperaturakh. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Investigations of Some Aspects in Concrete Curing at Negative Temperatures. Abstract of Ph.D. Thesis in Engineering Science]. Leningrad, 16 p. (in Russian).

7. Logoyda, A. V. (1984) Cold-Weather Concreting while Using Anti-Frost Concrete Additive. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 9, 23–26 (in Russian).

8. Gendin, V. Ya., & Kuzmin, V. K. (1987) Application Fields of Methods for Cold-Weather Concreting. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 5, 12–13 (in Russian).

9. Grapp, A. A., Grapp, V. B., & Kaplan, A. S. (1975) Structure and Frost Resistance of Concrete with Anti-Frost Additives. *2nd International Symposium on Cold-Weather Concreting*. Moscow, Stroyizdat, 60–68 (in Russian).

10. Rozenberg, T. I., Tokar, V. B., & Mamedov, A. A. (1975) Investigation of Processes on Curing of Concrete with Complex Additives at Temperature Lower than 0 °C. *2nd International Symposium on Cold-Weather Concreting*. Moscow, Stroyizdat, 152–163 (in Russian).

11. Okorokov, S. D., & Pariysky, A. A. (1975) Concrete Heat Liberation under Conditions of Cold-Weather Concreting. *2nd International Symposium on Cold-weather Concreting*. Moscow, Stroyizdat, 130–139 (in Russian).

12. Mchedlov-Petrosyan, O. P., Usherov-Marshak, A. V., & Urzhenko, A. M. (1984). *Heat Liberation when Hardening and Curing of Binders and Concrete*. Moscow, Stroyizdat. 224 p. (in Russian).

13. Usherov-Marshak, A. V., Pershina, L. A., & Krivenko, P. V. (1997) Assessment of Hydration Heat Contribution in Energy Balance for Hardening and Curing of Binders and Concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 3, 12–14 (in Russian).

14. Usherov-Marshak, A., Tsiak, M., Sopov, V., & Siniakin, A. (2001) Calorimetry as a Basis for Information Technology of New Generation Concrete. *Prospects for Development of New Technologies in Construction and Training of Personnel in the Republic of Belarus: Collection of Research Papers. 7th International Scientific and Methodological Workshop*. Brest: BrGTU [Brest State Technical University], 364–370 (in Russian).

15. Usherov-Marshak, A. V. (2002) *Kalopimetriia Tsementu i Betonu. Vibriani Pratsi* [Cement and Concrete Calorimetry. Selected Papers]. Kharkov, Fakt. 183 p. (in Ukrainian).

16. Batrakiy, V. G. (1998). *Modified Concrete. Theory and Practice. 2nd Revised and Corrected Edition*. Moscow, Stroyizdat. 768 p. (in Russian).

17. Bibik, M. S., & Babitsky, V. V. (2010) Assessment of Kinetics in Hardening of Cement Stone while Using Calorimetric Gauge of “Termokhron”-System. *Stroitelnaya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technique], 4 (31), 23–26 (in Russian).

18. Babitsky, V. V., Semeniuk, S. D., & Bibik, M. S. (2009) Prediction of Characteristics for Curing Heavy-Weight Concrete. *Resursoekonomnii Materiali, Konstruktsii, Budivli ta Sporudi: Zbirnik Naukovikh Prats* [Resource Saving of Materials, Structures, Buildings and Constructions. Collection of Scientific Papers]. Rovno, 18, 3–12 (in Ukrainian).

19. Bibik, M. S., Babitsky, V. V., & Semeniuk, S. D. (2011) Determination of Main Periods for Trapezoidal Regime of Concrete Curing. *Resursoekonomnii Materiali, Konstruktsii, Budivli ta Sporudi: Zbirnik Naukovikh Prats* [Resource Saving of Materials, Structures, Buildings and Constructions. Collection of Scientific Papers]. Rovno, 22, 22–28 (in Ukrainian).

20. Bibik, M. S. (2014) Influence of Mineral Additives on Cement Heat Liberation and Efficiency Assessment of their Application. *Resursoekonomnii Materiali, Konstruktsii, Budivli ta Sporudi: Zbirnik Naukovikh Prats* [Resource Saving of Materials, Structures, Buildings and Constructions. Collection of Scientific Papers]. Rovno, 28, 13–22 (in Ukrainian).

Received 03.09.2015

УДК 666.982.2

ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК ДЛЯ БЕТОНОВ

Докт. техн. наук ЮХНЕВСКИЙ П. И.¹⁾, канд. техн. наук, доц. ШИРОКИЙ Г. Т.¹⁾

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

E-mail: sawa1950@mail.ru

Проблема качества химических добавок сводится в большинстве случаев к проблеме их объективной, независимой оценки. Поскольку при поставке продукта для проведения испытаний никакой идентификации не производится, наблюдается разночтение в их результатах и, в конечном итоге, страдает качество строительной продукции. В связи с этим предлагается внести изменения в новую редакцию СТБ 1112–98 и ГОСТ 30459–2003, чтобы при поставках химических добавок для сертификационных испытаний документ о качестве добавки содержал эталон ИР-спектров с активными компонентами. Одновременно этот эталон должен прикладываться и к результатам испытаний добавки по нормируемым критериям эффективности по ГОСТ 30459–2003. Такие нормы заложены в аналогичных европейских стандартах.

Приведены стандартный метод идентификации органических добавок по ИР-спектрам, характеристические полосы поглощения для добавок типа «Лигнопан» и нафталинформальдегидного суперпластификатора С-3. Однако поскольку по величине полос поглощения нельзя судить о количестве функциональных групп в продукте, а только об их наличии, рекомендуется применять также другие методы. В качестве дополнительной характеристики предлагается определение величины дипольного момента молекулы добавки-пластификатора. Ранее авторами была разработана методика и определены дипольные моменты добавок-суперпластификаторов как в порошкообразном виде, так и в виде водных растворов, установлена корреляционная связь водоредуцирующей способности добавки с величиной дипольного момента. Производителям пластифицирующих добавок для бетонов предлагается наряду с ИР-спектрами в технической документации указывать величину дипольного момента молекулы как обобщенной характеристики, определяющей ее пластифицирующие свойства.

Ключевые слова: пластифицирующие добавки, эффективность, величина дипольного момента молекулы, метод идентификации.

Ил. 2. Библиогр.: 10 назв.

ON IDENTIFICATION OF CONCRETE PLASTICIZING ADDITIVES

YUKHNEVSKIY P. I.¹⁾, SCHIROKIJ G. T.¹⁾

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

Quality problem of chemical additives comes down in general to their objective and independent evaluation. As an identification is not made during product delivery for testing and while carrying out the testing there is difference in the results of investigations and finally construction products suffer from their poor quality. In this connection, it is proposed to make some alterations to revised version of the STB 1112–98 and GOST 30459–2003, so that while supplying chemical additives for certification testing a certificate on additive quality should contain a standard of IR-spectra with active components. Simultaneously, the standard should be applied for additive testing results in accordance with rate efficiency criteria for GOST 30459–2003. Such norms are accepted for similar European standards.

The paper presents a standard method for identification of organic additives according to IR-spectra, characteristic absorption bands for the Lignopan-type additives and naphthalene formaldehyde super-plasticizer C-3. However, due to the fact that it is not possible to judge number of functional groups in the product by absorption band size but it is possible only to assess their availability so it is recommended to use other methods. As an additional characteristics it is proposed to determine magnitude of the dipole moment in a plasticizer-additive molecule. The authors previously developed a technique and determined dipole moments in super-plasticizer-additives as in the form of powder so in the form of aqueous solutions, correlation relationship of water reduction additive capability with the magnitude of dipole moment. It has been proposed to manufacturers of plasticizing additives for concrete along with IR-spectra in the technical documentation to indicate a magnitude of the molecule dipole moment as a generalized characteristics that determines its plasticizing properties.

Keywords: plasticizing additives, efficiency, magnitude of molecule dipole moment, identification method.

Fig. 2. Ref.: 10 titles.

Количество химических модификаторов бетонных смесей и бетонов и объемы их применения постоянно растут. В России уже до 60–70 % бетона изготавливается с применением различ-

ных добавок. Увеличиваются объемы их использования и в Республике Беларусь. Например, при возведении Национальной библиотеки до 70 % бетона уложено с применением раз-

личных химических добавок, при строительстве атомной станции бетона с добавками укладывается до 90 %.

В СССР производились суперпластификаторы на основе меламин (МФАС, 10-03), нафталина (С-3, 30-03), фенола и фенольных смол (М-1) и др. Осуществлялся промышленный выпуск около десяти модификаций ЛСТ, воздухововлекающих добавок типа СНВ, гидрофобизирующих типа ГКЖ-10 (11), ГКЖ-94 и др. [1]. В СССР существовал ряд научных центров, где велась разработка новых добавок при наличии квалифицированных специалистов, оборудования и, конечно, государственного финансирования. Это позволяло осуществлять если не всестороннее, то достаточно глубокое изучение перспективных добавок. Поэтому при их промышленном применении не возникало опасных неожиданностей.

Развивающейся строительной индустрии Республики Беларусь необходимы новые технологии и материалы, а от разработчиков ждут современных добавок. В связи с уменьшением государственного финансирования изобретением новых добавок занимаются, как правило, исследователи, не всегда обладающие достаточным багажом знаний. В результате строительный рынок наводнен зарубежными, часто не проверенными химическими и самодельными комплексными добавками.

Проблема качества химических добавок сводится в большинстве случаев к проблеме их объективной, независимой оценки. Это касается в первую очередь импортных и вновь создаваемых добавок. Различные научные центры и лаборатории, аккредитованные в области сертификации химических добавок, не несут ответственности за результаты испытаний. Ведь при поставке продукта для испытаний и их проведении никакой идентификации не производится, хотя возможность ее для органических добавок в СТБ 1112–98 [2] предусмотрена. В итоге наблюдается разночтение в результатах испытаний и, в конечном счете, страдает качество строительной продукции. В связи с этим предлагается внести изменения в новую редакцию СТБ 1112–98 и ГОСТ 30459–2003 [2, 3], чтобы при поставках химических добавок для сертификационных испытаний документ о качестве добавки содержал эталон ИР-спектров

с активными компонентами. Одновременно этот эталон должен прикладываться и к результатам испытаний добавки по нормируемым критериям эффективности по ГОСТ 30459. Такие нормы заложены в аналогичных европейских стандартах EN 480-6 и EN 934-2 [4, 5]. С учетом этого должны быть определены новые критерии выдачи лицензий и сертификатов, что позволит снизить поток фальшивых добавок и уменьшить объемы брака в строительстве, повысит ответственность руководителей аккредитованных центров за результаты испытаний.

Рассмотрим метод идентификации химических добавок. В настоящее время инфракрасная спектроскопия стала одним из основных физических методов исследования в химии, с помощью которого можно решать задачи качественного и количественного анализа вещества и судить о строении молекул. Особенно широко используется ИР-спектроскопия в органической химии для структурно-группового анализа и идентификации самых различных соединений. Благодаря простоте и автоматизации получения спектров метод ИР-спектроскопии нашел широкое применение в научных лабораториях и служит надежным методом контроля на химическом производстве.

Инфракрасная область спектра занимает диапазон длин волн от границы видимой до микроволновой области, т. е. от 0,75 до 200,00 мкм. Однако обычно под инфракрасной областью подразумевают более узкий интервал – от 2,5 до 16,0 мкм. Для характеристики инфракрасного излучения используют волновые числа, т. е. величины, обратные длинам волн, измеренным в сантиметрах. Единицей волнового числа является обратный сантиметр (см^{-1}). Так, интервал 2,5–16,0 мкм соответствует интервалу 4000–625 см^{-1} [6, 7].

Молекулой поглощаются только те частоты инфракрасного излучения, энергия которых точно соответствует разностям между двумя уровнями энергии связи; амплитуда данного колебания, следовательно, возрастает не постепенно, а скачком. При облучении образца инфракрасным светом с непрерывно меняющейся частотой определенные участки спектра излучения должны поглощаться молекулой, вызывая растяжение или изгиб соответствующих

связей. Луч, проходящий через вещество, ослабляется в зоне поглощения. Регистрируя интенсивность прошедшего излучения в зависимости от волновых чисел или длин волн, получают кривую, на которой видны полосы поглощения. Соответственно полосы углеводов, состоящих только из атомов углерода и водорода, являются слабыми, а полосы, относящиеся к связям, соединяющим атомы, сильно различающиеся между собой по степени электроотрицательности, например C—N, C—O, C=O, C≡N, SO₃, NO₂, – обычно довольно сильными.

Достаточно интенсивные полосы поглощения, проявляющиеся в области, характерной для определенной группы, и пригодные для идентификации этой группы, называются характеристическими полосами поглощения или характеристическими частотами. За последние 40 лет собрано множество данных, относящихся к этим полосам, и многие полосы в области «отпечатков пальцев» теперь также эффективно используются для характеристики различных групп. Кроме того, полосы поглощения непосредственно отражают состояние связей в молекуле и в силу этого позволяют получать существенную информацию, представляющую теоретический интерес. Интенсивность полосы поглощения пропорциональна количеству исследуемого вещества, и это обстоятельство лежит в основе еще одного важного направления применения инфракрасной спектроскопии – количественного анализа [7].

Методика снятия IR-спектров обычно следующая. Навеска исследуемого порошкообразного продукта массой 2–4 мг распылением смешивается с 800 мг порошка KBr и запрессовывается в прозрачную или полупрозрачную таблетку. Для жидких продуктов образец в виде капли наносится на пластинку KRS (или пластинку KBr) и прижимается второй такой пластинкой для образования тонкой пленки. Подготовленные образцы закладываются в IR-спектрометр с Фурье-преобразованием марки M2000 Series. Для обработки спектров используется программа GRAMS/32 фирмы Galactic. Условия съемки: разрешение 4 см⁻¹; волновое число $\nu = 400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$. Хотя эти методы широко применяются, они имеют серьезные ограничения и не могут быть приняты как стандартные для всех образцов.

Метод «жидкой пленки» применим к нелетучим, не реакционно способным образцам. Желательно, чтобы в пределах сечения светового луча спектрометра толщина образца была одинаковой. Спектры, полученные таким путем, не очень воспроизводимы, и приходится прибегать к методу проб и ошибок, чтобы получить удовлетворительный результат.

Во-первых, влияние на качество спектра оказывают растворители. Поскольку все общепринятые растворители поглощают в IR-области, исследователь должен использовать тонкие слои и выбирать те из растворителей, которые имеют окна прозрачности в интересующих областях спектра. Кроме того, растворитель должен быть химически инертным по отношению к образцу. Для обычной работы в области 625–4000 см⁻¹ общепринято использовать CCl₄ или C₂Cl₄ при 1330–4000 см⁻¹ и CS₂ при 625–1330 см⁻¹.

Во-вторых, на характеристики спектра сильно влияет концентрация. Большинство органических веществ дает хорошие спектры при концентрациях 1 г/10 см³ в кювете толщиной 0,1 мм в интервале 625–4000 см⁻¹. При этом очень важно стандартизировать растворители и условия разбавления, так как спектры могут резко изменяться при разбавлении или изменении растворителей. Пики полос поглощения, характерные для определенных функциональных групп, сохраняются, но интенсивность полос резко изменяется. Чем больше концентрация, тем выше интенсивность поглощения, хотя содержание групп может быть меньше.

Метод прессованных таблеток с KBr рекомендуется для образцов, которые:

- 1) нерастворимы в обычных IR-растворителях;
- 2) аморфны или имеют устойчивую кристаллическую структуру;
- 3) не содержат ионов, способных к обмену.

Образцы IR-спектров химических добавок показаны на рис. 1, 2. Приведем некоторую характеристику, например для пластифицирующей добавки С-3 (полиметиленаполифталинсульфонаты натрия). Полосы поглощения в областях 3054, 1595, 1504, 1443 характерны для бензольного кольца; полосы в областях 1356, 1443, 117 и 1184 – для сульфонатов типа R—SO₂—OR', полосы в областях 620, 682 и 1035 – для сульфокислот типа R—SO₂—OH.

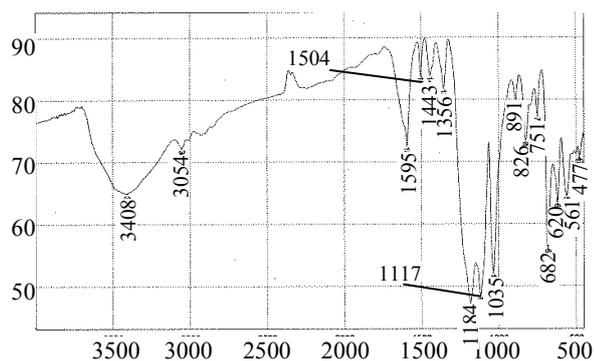


Рис. 1. IR-спектры добавки С-3 (натриевая соль продукта конденсации нафталисульфокислоты и формальдегида)

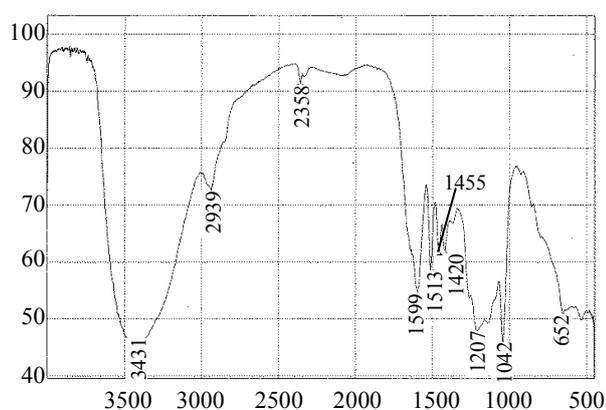
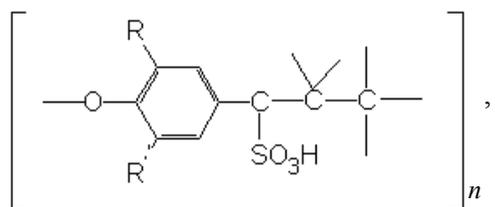


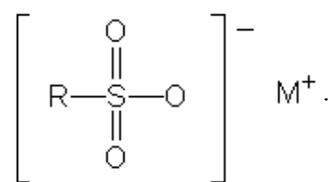
Рис. 2. IR-спектры добавки «Лигнопан Б-1» (смесь модифицированных лигносульфонатов, сополимеров акрилового ряда, неорганических солей и простых эфиров целлюлозы)

По данным производителя, добавки «Лигнопан» представляют собой смесь модифицированных лигносульфонатов, сополимеров акрилового ряда, неорганических солей и простых эфиров целлюлозы. В общем виде формула лигносульфонатов выглядит следующим образом:



где R=R=H; R=H; R=OCH₃; R=R=OCH₃.

Существенный вклад в основное свойство добавки, обуславливающее пластифицирующий эффект, вносят ионогенные группы – соли сульфоновой кислоты



На всех IR-спектрах продукта «Лигнопан» им присущи полосы поглощения в областях 1038–1043 и 1184–1207 см⁻¹ (рис. 2). В продукте, содержащем большее количество простых эфиров целлюлозы, появляется полоса поглощения, характерная для групп С—О—С с частотой поглощения 1131 см⁻¹, на которую накладываются полосы неорганических сульфатов в области 1080–1130 см⁻¹.

Анализируя IR-спектры «Лигнопанов», можно судить о качестве добавки по содержанию солей сульфоновой кислоты (полосы 1037–1043 и 1180–1207 см⁻¹), метокси-групп R—OCH₃ (1451–1458 см⁻¹), простых эфиров целлюлозы (1131 см⁻¹), а также неорганических сульфатов SO₄⁻² (1123 и 622 см⁻¹) и карбонатов CO₂⁻² (1423 см⁻¹). Характеристическими полосами поглощения для «Лигнопана Б-1» являются полосы в областях 1042 и 1207 см⁻¹ для группы SO₃⁻, еле заметная (не обозначена цифрами) при 1130 см⁻¹ для С—О—С, и новая, едва заметная полоса при 1080 (не обозначена цифрами) для неорганических сульфатов SO₄⁻², бензольного кольца – 1599 и 1513 см⁻¹.

Таким образом, используя только метод IR-спектроскопии довольно трудно однозначно идентифицировать вещество. По величине полос поглощения нельзя судить о количестве функциональных групп в продукте, а только об их наличии. Дополнительно необходимо применять химические методы, например определение кислотно-щелочного числа продукта и потенциометрическое титрование.

Проблема выявления взаимосвязи между строением (структурой) органического соединения и проявляемыми им свойствами, например между электронным строением и пластифицирующей способностью, является актуальной задачей практической органической химии добавок-пластификаторов для цементного бетона не только с позиций идентификации добавок, но и в процессе создания новых пластификаторов с заданными свойствами. При известных виде функциональных групп, форме и наличии боковых цепей химических добавок удается предсказывать характер их влияния на цементный бетон. Рассчитав значение дескриптора молекулярной

структуры (квантовохимическим или экспериментальным методом), удастся прогнозировать свойства модифицированного цементного бетона в зависимости от характеристик электронной структуры химических добавок, сформировать научные принципы подбора новых добавок и прогнозирования их свойств [8]. При этом обобщенное значение дескриптора молекулярной структуры, например значение дипольного момента, может служить в качестве активных компонентов наряду с IR-спектрами для идентификации химических добавок.

В [9] была приведена методика и определены дипольные моменты добавок-суперпластификаторов как в порошкообразном виде, так и в виде водных растворов. Учитывая то, что уменьшение водосодержания бетонной смеси линейно зависит от расхода цемента, предложены формулы для расчета снижения водосодержания бетонной смеси с добавками олигомеров

$$\Delta W = (0,0028\mu^{0,9057} + 0,0341D)\rho^{0,3088}$$

и для нафталинформальдегидного суперпластификатора С-3

$$\Delta W = (4,0628\mu^{-4,8086} + 0,0001D)\rho^{0,9075},$$

где μ – дипольный момент молекулы, D ; D – количество добавки, % от массы цемента; ρ – расход среднеалюминатного цемента, кг/м³.

Максимальное отклонение расчетных данных от фактических составляет $\Delta_{\max} = 0,02$ [10].

Для других добавок-суперпластификаторов уравнение имеет тот же вид, изменяются лишь коэффициенты при переменных. Это обусловлено тем, что с изменением структуры молекулы добавки изменяется и доля стерической составляющей пластифицирующего эффекта, учесть влияние которой пока не представляется возможным.

ВЫВОД

Производителям пластифицирующих добавок для бетонов предлагается наряду с IR-спектрами в технической документации указывать величину дипольного момента молекулы как обобщенной характеристики, определяющей ее пластифицирующие свойства. Это повысит достоверность идентификации добавок и позволит качественнее оценивать их эффективность в бетонах по основному действию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение добавок в бетоне: ПП–99 к СНиП 3.09.01–85. – Введ. 01.07.2000. – Минск: Минстройархитектуры, 2000. – 33 с.
2. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112–98. – Введ. 01.01.1999. – Минск: Минстройархитектуры, 1998. – 23 с.

3. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности: ГОСТ 30459–96. – Введ. 01.07.1998. – Минск: Минсктиппроект, 1998. – 40 с.

4. Admixtures for Concrete, Mortar and Grout. Test Methods. Part 6: Infrared Analysis; German Version: DIN EN 480-6:2005. – Introduced 01.12.2005. – 7 p.

5. Admixtures for Concrete, Mortar and Grout. Part 2: Concrete Admixtures. Definitions, Requirements, Conformity, Marking and Labelling; German Version: DIN EN 934-2:2009+A1:2012. – Introduced 01.08.2012. – 25 p.

6. Наканиси, К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений / К. Наканиси. – М.: Мир, 1965. – 216 с.

7. Смит, А. Прикладная ИК-спектроскопия / А. Смит. – М.: Мир, 1982. – 327 с.

8. Юхневский, П. И. Критериальная оценка добавок-пластификаторов бетонных смесей для прогноза их эффективности / П. И. Юхневский // Известия вузов. Строительство. – 2012. – № 5. – С. 36–43.

9. Юхневский, П. И. Определение дипольных моментов добавок-пластификаторов для цементных бетонов / П. И. Юхневский // Вестник БНТУ. – 2010. – № 2. – С. 11–14.

10. Юхневский, П. И. О корреляционной связи водоредуцирующей эффективности с величиной дипольного момента химической добавки-пластификатора / П. И. Юхневский, В. М. Зеленковский, В. С. Солдатов // Технологии бетонов. – 2010. – № 9–10. – С. 28–29.

Поступила 15.05.2015

REFERENCES

1. ПП–99 for Standard SNiP 3.09.01–85 [Construction Rules and Regulations]. Application of Additives in Concrete. Minsk: Architecture and Construction Ministry of the Republic of Belarus, 2000. 33 p. (in Russian).
2. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1112–98. Additives for Concrete. General Technical Specifications. Minsk: Architecture and Construction Ministry of the Republic of Belarus, 1998. 23 p. (in Russian).
3. State Standard 30459–2003. Additives for Concrete. Methods for Efficiency Determination. Minsk: Minsktiproekt, 1998. 40 p. (in Russian).
4. DIN EN 480-6:2005. Admixtures for Concrete, Mortar and Grout. Test Methods. Part 6: Infrared Analysis. German Version. 7 p.
5. DIN EN 934-2:2009+A1:2012. Admixtures for Concrete, Mortar and Grout. Part 2: Concrete Admixtures. Definitions, Requirements, Conformity, Marking and Labelling. German Version. 25 p.
6. Nakanisi, K. (1965) *Infrared Spectra and Structure of Organic Compounds*. Moscow, Mir. 216 p. (in Russian).
7. Smith, A. (1982) *Applied Infrared Spectroscopy*. Moscow, Mir. 327 p. (in Russian).
8. Yuhnevskiy, P. I. (2012) Criteria Assessment of Plasticizing Additive for Concrete Mixes with the Purpose to Forecast Their Efficiency. *Izvestiia Vuzov. Stroitelstvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 5, 36–43 (in Russian).
9. Yuhnevskiy, P. I. (2010) Determination of Dipole Moments in Plasticizing Additives for Cement Concrete. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], 2, 11–14 (in Russian).
10. Yuhnevskiy, P. I., Zelenkovskiy, V. M., & Soldatov, V. S. (2010) On Correlation Relationship of Water-Reducing Efficiency with the Dipole Moment Value of Chemical Plasticizing Additive. *Tekhnologii Betonov* [Concrete Technologies], 9–10, 28–29 (in Russian).

Received 15.05.2015

СУХАЯ СМЕСЬ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕНОБЕТОНА

Докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ С. Н.¹⁾, докт. хим. наук, проф. СВИРИДОВ Д. В.²⁾,
канд. хим. наук ЩУКИН Г. Л.²⁾, РАДЮКЕВИЧ П. И.³⁾,
канд. хим. наук БЕЛАНОВИЧ А. Л.²⁾, САВЕНКО В. П.²⁾, канд. хим. наук КАРПУШЕНКОВ С. А.²⁾

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

²⁾Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Закрытое акционерное общество «Парад» (Минск, Республика Беларусь)

E-mail: sleonovich@mail.ru

Разработан состав сухой смеси для изготовления неавтоклавногo пенобетона естественного твердения на основе портландцемента, пенообразователя Ufapore, минеральных добавок (сульфоалюминатная добавка РСАМ, микрокремнезем МК-85, базальтовое волокно), пластифицирующей и ускоряющей добавки «Цитрат-Т» и рeдиспергируемого порошка Vinnapas-8034H. Установлено, что при затворении сухой смеси водой (В/Т = 0,4–0,6), последующем механическом вспучивании и отверждении пеномассы формируется пенобетон плотностью 400–800 кг/м³, прочностью 1,1–3,4 МПа, с низким водопоглощением (40–50 %), без усадочных трещин. Введение в состав сухой смеси ускоряющей и пластифицирующей добавки «Цитрат-Т» приводит к повышению реологических свойств вспененной пеномассы и сокращению времени ее схватывания и твердения. Проведенное с помощью растрового электронного микроскопа исследование микроструктуры поверхности сколов пенобетона показало, что введение в состав сухой смеси базальтового волокна и рeдиспергируемого порошка Vinnapas-8034H способствует формированию более мелкодисперсных кристаллогидратов. Это позволяет целенаправленно изменять морфологию кристаллогидратов и управлять процессом структурообразования пенобетона.

Ключевые слова: сухая смесь, пенобетон, минеральные добавки, ускоряющая и пластифицирующая добавка.

Ил. 1. Библиогр.: 10 назв.

DRY MIX FOR OBTAINING FOAM CONCRETE

LEONOVICH S. N.¹⁾, SVIRIDOV D. V.²⁾, SHCHUKIN G. L.²⁾, RADYUKEVICH P. I.³⁾,
BELANOVICH A. L.²⁾, SAVENKO V. P.²⁾, KARPUSHENKOV S. A.²⁾

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

²⁾Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Closely-Held Stock Company "Parade" (Minsk, Republic of Belarus)

Composition of a dry mix has been developed for production of non-autoclaved foam concrete with natural curing. The mix has been created on the basis of portland cement, Ufapore foaming agent, mineral additives (RSAM sulfoaluminate additive, МК-85 micro-silica and basalt fiber), plasticizing and accelerating "Citrate-T" additive and redispersible Vinnapas-8034H powder. It has been established that foam concrete with density of 400–800 kg/m³, durability of 1,1–3,4 MPa, low water absorption (40–50 %), without shrinkable cracks has been formed while adding water of Water/Solid = 0,4–0,6 in the dry mix, subsequent mechanical swelling and curing of foam mass. Introduction of the accelerating and plasticizing "Citrate-T" additive into composition of the dry mix leads to an increase of rheological properties in expanded foam mass and time reduction of its drying and curing. An investigation on microstructure of foam-concrete chipping surface carried out with the help of a scanning electron microscope has shown that the introduction of basalt fiber and redispersible Vinnapas-8034H powder into the composition of the dry mix promotes formation of more finely-divided crystalline hydrates. Such approach makes it possible to change purposefully morphology of crystalline hydrates and gives the possibility to operate foam concrete structurization process.

Keywords: dry mix, foam concrete, mineral additives, accelerating and plasticizing additive.

Fig. 1. Ref.: 10 titles.

Среди теплоизоляционных строительных материалов ячеистые бетоны – пенобетон и газобетон (автоклавногo) – по комплексу технических, экономических, экологических показате-

телей и долговечности превосходят все другие теплоизоляционные материалы. Неавтоклавногo пенобетон является многофункциональным строительным материалом, изготавливаемым

из недорогого и доступного сырья, представляет собой обычный цементный раствор, в состав которого входят пенообразующие и минеральные добавки. Используются они для того, чтобы бетонную массу наполнить воздушными пузырьками. Причем распределяются пузырьки равномерно по всему объему материала, тем самым делая бетон более легким, с высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами. Изготовление пенобетона не представляет сложностей, достаточно иметь специальный пеногенератор и смеситель, в котором происходит смешивание цемента с пеной. Что касается газобетона, то в состав материала входят кварцевый песок, цемент, известь, алюминиевая пудра и вода. Приготовление материала можно сравнить с приготовлением дрожжевого теста, так как раствор поднимается и увеличивается в объеме из-за выделения водорода. Отличие пенобетона от газобетона начинается с процесса изготовления, так как твердение газобетона осуществляется в определенных технологических условиях, а именно – в автоклаве. То есть такой материал можно изготовить в специально оборудованном цехе.

Пенобетон имеет пористую структуру с преобладанием замкнутых пор сферической формы по всему объему в отличие от труднорегулируемой формы при получении анизотропной пористой структуры газобетонов. Но у пенобетона есть свои недостатки: его структурная прочность ниже, чем у автоклавного газобетона, влажностная усадка в 2–4 раза больше и устойчивость пенобетонной массы в ранние сроки твердения низкая.

Основным недостатком пенобетона неавтоклавного способа твердения является низкая степень гидратации вяжущего в отличие от автоклавного способа производства, при котором твердение газобетонной смеси происходит как в результате гидратации вяжущего при повышенных температуре и давлении, так и в результате гидротермальной реакции взаимодействия диоксида кремния (кварцевый песок) и оксида кальция (известь). Низкая степень гидратации цемента, которая является следствием плохой закристаллизованности продуктов гидратации, может быть причиной усадки неавтоклавных пенобетонов в процессе эксплуатации. Преодолеть данный недостаток можно

за счет использования ускорителей гидратации и твердения, активных минеральных добавок и снижения начального водотвердого отношения с помощью специальных добавок.

Идеологической основой новой технологии пенобетона может стать принцип производства строительных материалов из предварительно приготовленных сухих смесей. Неоспоримое достоинство изготовления и применения сухих смесей – технологическая стабильность, проявляющаяся в высокой точности дозирования, степени гомогенизации их компонентов. Отсюда и стабильность технологических и эксплуатационно-технических свойств конечного материала. Анализ современного состояния производства сухих смесей у нас и за рубежом показал, что при всем разнообразии сухие смеси для получения пенобетона среди них практически отсутствуют.

Целью исследований авторов является разработка состава сухой смеси для изготовления из нее неавтоклавного пенобетона естественного твердения. Для решения этой задачи исследовали влияние различных пенообразователей и минеральных добавок на плотность, структуру и прочностные характеристики пенобетона; устанавливали оптимальные концентрации пенообразователя и минеральных добавок; разрабатывали состав сухой смеси.

Благодаря применению сухих смесей можно добиться повышения производительности труда, стабильности составов и, как следствие, повышения качества строительных работ, длительности срока хранения смесей без изменения свойств и расходования по мере необходимости. В качестве основы для разработки сухой смеси при получении пенобетона брали портландцемент М500-Д0, не содержащий гипса.

При получении сухих смесей для производства пенобетона наиболее важным является выбор пенообразователя с максимальной кратностью пены и ее высокой устойчивостью в пеноцементной смеси, позволяющего получить пенобетон с качественной структурой (с равномерно распределенными сферическими порами одинакового диаметра). Свойства используемого пенообразователя оказывают непосредственное влияние и на технико-эксплуатационные показатели получаемого пенобетона.

В производстве ячеистых бетонов применяются в основном жидкие пенообразователи из различного сырья, а также пенообразователи в твердом и порошкообразном виде – натриевая соль алкилбензолсульфокислоты, лаурилсульфат натрия, оксиэтилованный лаурилсульфат, Ufapore (Норвегия), Berolan LP-50 и Berolan LP-W1 (Норвегия). Перечисленные сухие пенообразователи имеют как положительные, так и отрицательные свойства. Основным недостатком большинства из них, особенно синтетических, являются малая кратность пены и ее устойчивость во времени в пенобетонной смеси.

Эффективность пенообразователей, применяемых в технологии строительных материалов, определяется комплексом свойств, основным из которых является пенообразующая способность их в водном цементном растворе при его вспенивании. Кроме того, пенообразующие свойства зависят от его концентрации в цементной смеси, растворимости, продолжительности и интенсивности вспенивания цементного раствора, наличия различных добавок и др.

Пенобетон получали путем механического перемешивания (300 об/мин) сухой смеси с водой при водотвердом отношении В/Т = 0,4–0,6 в течение 5 мин, последующего вспучивания с помощью миксера (2000 об/мин) в течение 2 мин и отверждения вспученной пеномассы. Для установления оптимальных условий получения устойчивой вспененной цементной массы проведена оптимизация исследуемых пенообразователей по этому показателю. Установлено, что наибольшей стабильностью обладает вспененная цементная масса при использовании порошкообразного пенообразователя Ufapore при его концентрации 0,5 % от массы цемента. Однако оказалось, что устойчивость вспененной цементной массы сохраняется в течение 30–40 мин, а затем начинается ее осадка с уменьшением объема пеномассы на 40–50 % и последующее ее твердение в течение 24 ч.

В БГУ разработана добавка «Цитрат-Т» [1], которая позволяет повысить пластичность цементного раствора и ускорить время схватывания и твердения цементного камня и бетона. Использование этой добавки в сухой смеси в количестве 6 % от массы цемента позволило повысить реологические свойства вспененной

цементной массы (расплав миниконуса в присутствии 6 % добавки «Цитрат-Т» составлял 85–50 мм, в то время как без нее – 45–48 мм), устойчивость пеномассы (осадка пеномассы не наблюдалась вплоть до ее схватывания и твердения) и ускорить время схватывания (4 ч) и твердения (6 ч) пенобетона по сравнению с пеномассой без добавки «Цитрат-Т» (24 ч и более).

В процессе эксперимента установлено, что при вспучивании сухой смеси, содержащей 6,0 % добавки «Цитрат-Т» и 0,5 % пенообразователя Ufapore от массы цемента, при В/Т = 0,4–0,6 формируется пенобетон с плотностью 300–700 кг/м³, при сушке которого через 10–15 сут. появляются усадочные трещины за счет образования большого количества этtringита на единицу объема пенобетона [2]. Основным компонентом, необходимым для образования этtringита, является гидроксид кальция, выделяющийся при гидратации портландцемента. Снижение количества этtringита может быть достигнуто за счет связывания гидроксида кальция в процессе начального структурообразования пенобетона в труднорастворимые соединения. Классический прием связывания гидроксида кальция в цементном камне в труднорастворимые низкоосновные гидросиликаты – введение аморфного кремнезема. Упрочняющее действие микрокремнезема в пенобетонах было установлено в [3, 4]. Пенобетон, содержащий 5–7 % микрокремнезема, имеет класс прочности, равный автоклавному газобетону.

В процессе исследований использовали микрокремнезем МК-85 – побочный продукт взаимодействия ферросилиция, который вводили в сухую смесь в количестве 1–10 % от массы цемента, что увеличивало прочность пенобетона до 5 %. Дальнейшее повышение содержания микрокремнезема снижает прочность пенобетона. Это объясняется необходимостью увеличения водопотребности смеси из-за высокой удельной поверхности микрокремнезема.

Повышение прочности пенобетона при введении в его состав микрокремнезема в количестве 5 % от массы цемента связано с влиянием микрокремнезема на тиксотропные свойства системы путем изменения протяженности структурных элементов – цепочек – и их перехода при контактных взаимодействиях в пространственные каркасные ячейки. Это условие

соответствует минимальным значениям межфазного натяжения при максимальном развитии граничных поверхностей, что предполагает существование большого числа точечных коагуляционных контактов вплоть до создания предельного наполнения системы, в которой массовый переход к сцеплению в ближнем порядке вызывает упрочнение.

В [5, 6] имеются данные об использовании в составе ячеистобетонных смесей модифицирующих добавок, способных интенсифицировать процессы твердения пенобетона, изменять состав цементирующего вещества межпоровых перегородок, что приводит к улучшению физико-механических характеристик пенобетона. К таким добавкам следует отнести РСАМ, представляющую собой расширяющийся сульфоалюминатный модификатор, который позволяет придать цементу такие свойства, как обеспечение компенсации усадочных деформаций и повышение прочности. Установлено, что добавка РСАМ обладает расширяющим эффектом и в неавтоклавном бетоне, что дает возможность использовать ее для компенсации усадки пенобетона в присутствии ускоряющей и пластифицирующей добавки «Цитрат-Г». Определена граничная концентрация РСАМ в количестве 5–8 % от массы цемента, введение которой в сухую смесь обеспечивает проявление расширяющего эффекта при получении пенобетона.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что дисперсное армирование пенобетонов различными волокнами все более широко применяется во многих областях строительства. Безусловно, добавление в пенобетон фибр не может изменить ни плотность, ни теплопроводность данного материала. Это может сказаться на прочностных показателях. Одним из основных недостатков пенобетона является его высокая хрупкость, что приводит к трещинам и сколам в блоках при работе с ними. Кроме того, для неавтоклавных пенобетонов характерны высокие усадочные деформации, в связи с чем получают изделия с трещинами или они вообще разрушаются. Введение в состав пенобетона минеральных волокон позволяет устранить или, по крайней мере, свести к минимуму эти отрицательные качества.

Повысить прочностные характеристики, трещиностойкость и усадочные явления пенобетонов можно за счет введения оптимального количества базальтового волокна и его рав-

номерного распределения в пенобетонной смеси. Базальтовое волокно – побочный продукт получения базальтового ровинга. Установлено [7, 8], что по границе пеноцементной массы и базальтового волокна, находящегося в аморфном состоянии, проходит хемосорбционное взаимодействие с появлением дополнительных новообразований, относящихся к низкоосновным гидросиликатам кальция. На поверхности тонких базальтовых волокон в местах механических дефектов создаются центры кристаллизации с образованием сети тонких гексагональных пластин и игольчатых кристаллов, срастающихся со сферическими зёрнами цементной системы, дополнительно усиливая действия волокна как дисперсной арматуры.

Учитывая эффективность рассмотренных минеральных добавок, таких как микрокремнезем МК-85, РСАМ и базальтовое волокно, проведено экспериментальное исследование по оптимизации состава сухой смеси на основе портландцемента, пенообразователя Ufaroge (0,5 %), ускоряющей и пластифицирующей добавки «Цитрат-Г» (6 %) и установлении оптимальных концентраций минеральных добавок в составе сухой смеси на физико-механические свойства пеноцементной массы и пенобетона. Оптимальными концентрациями минеральных добавок в составе сухой смеси являются (% от массы цемента): микрокремнезем МК-85 – 5 %; РСАМ – 5 %; базальтовое волокно – 4 %. Изготовление пенобетона из такого состава сухой смеси и его отверждение позволяют получить неавтоклавный пенобетон плотностью 300–700 кг/м³ в зависимости от В/Т = 0,4–0,6 и прочностью на сжатие 0,5–1,8 МПа без содержания усадочных трещин. Однако получаемый пенобетон обладает недостаточной прочностью, мелением поверхности и высоким водопоглощением. С целью устранения этих недостатков в состав сухой смеси вводили редиспергируемый порошок (РПП) Vinnapas-8034Н (сополимер этилена, винилаурата и винилхлорида).

РПП представляют собой сухие полимеры, полученные методом распылительной сушки латексной дисперсии в воде [9, 10]. При затворении водой РПП вновь образуют водные полимерные дисперсии. РПП используют в основном в сухих строительных смесях, растворам которых они придают повышенную прочность контактного сцепления компонентов сухих

смесей и улучшают гидрофобные свойства. После затворения модифицированной РПП сухой смеси водой полимерный порошок полностью редуспергируется (переходит в дисперсную форму). В процессе образования водно-цементного геля пенобетона и его отверждения частицы дисперсии образуют пленки. Эти полимерные пленки находятся в полостях и пустотах затвердевшего пенобетона и повышают его прочность. Пленки полимера проявляют хорошую адгезию к затвердевшим частицам компонентов пенобетона, что обеспечивает их прочное прикрепление к цементной структуре. Таким образом, в материале возникают две структуры: цементный каркас пенобетона и армирующая сетка из полимерных пространственных пленок, которые работают совместно и обеспечивают требуемые эксплуатационные свойства пенобетона.

морфологии кристаллогидратов в сторону образования более мелких игольчатых кристаллов (рис. 1).

На рис. 1а представлена микроструктура поверхности скола пенобетона, изготовленной из сухой смеси, не содержащей базальтового волокна и полимерного порошка Vinnapas-8034H, на рис. 1б – содержащей дополнительно 4 % базальтового волокна, а на рис. 1в – содержащей дополнительно 4 % базальтового волокна и 3 % порошка Vinnapas-8034H. Как видно из приведенных на рис. 1 микрофотографий сколов пенобетона, введение полимерного порошка Vinnapas-8034H способствует формированию более мелкодисперсных кристаллогидратов, что позволяет целенаправленно изменять морфологию кристаллогидратов и управлять процессом структурообразования пенобетона.

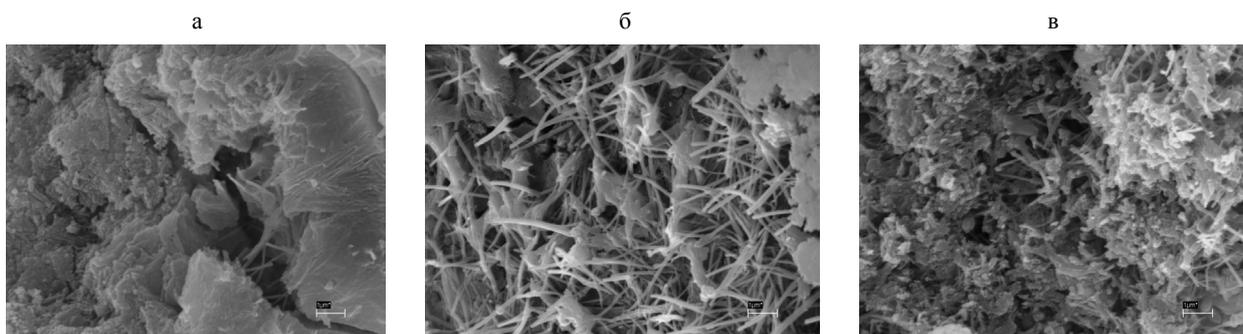


Рис. 1. Микроструктура поверхности скола пенобетона, полученного из сухой смеси:
а – не содержащей базальтового волокна и полимерного порошка Vinnapas-8034H;
б – содержащей дополнительно 4 % базальтового волокна;
в – содержащей дополнительно 4 % базальтового волокна и 3 % порошка Vinnapas-8034H

Как показало исследование, введение в состав сухой смеси порошка Vinnapas-8034H в количестве 3 % от массы цемента приводит к снижению меления поверхности пенобетона, увеличению на 50–100 кг/м³ его плотности, в 1,5–2 раза прочности на сжатие и уменьшению на 40–50 % водопоглощения.

Проведенное с помощью микроскопа Leo-1420 исследование микроструктуры поверхности сколов пенобетона показало, что введение в состав сухой смеси на основе портландцемента пенообразователя Ufaroge и минеральных добавок (сульфоалюминатная добавка РСАМ, микрокремнезем МК-85, базальтовое волокно), а также добавки «Цитрат-Т» и порошка Vinnapas-8034H приводит к изменению

ВЫВОД

Разработан состав сухой смеси на основе портландцемента, пенообразователя Ufaroge, ускоряющей и пластифицирующей добавки «Цитрат-Т», микрокремнезема МК-85, сульфалюминатной добавки РСАМ, базальтового волокна и полимерного порошка Vinnapas-8034H, при затворении которой водой при В/Т = 0,4–0,6, последующем механическом вспучивании (2000 об/мин) и отверждении пеномассы формируется неавтоклавный пенобетон плотностью 400–800 кг/м³, прочностью 1,1–3,4 МПа, с низким водопоглощением 50–60 %, не содержащим усадочных трещин и близким по свойствам к автоклавному пенобетону.

ЛИТЕРАТУРА

1. Продление срока годности растворяемых смесей / С. Н. Леонович [и др.] // Строительные материалы. – 2012. – № 10. – С. 74–77.
2. Способ получения ускорителя твердения для бетонов и строительных растворов: пат. РБ 18077. С 04 В 24/04 / В. П. Савенко, Г. Л. Щукин, С. Н. Леонович, Д. В. Свиридов, А. Л. Беланович, П. И. Радюкевич, С. А. Карпушенков; дата публ. 30.10.2012.
3. Величко, Е. Г. Рецептурно-технологические проблемы пенобетона / Е. Г. Величко, А. Г. Комар // Строительные материалы. – 2004. – № 3. – С. 26–29.
4. Удачкин, И. Б. Ключевые проблемы развития производства пенобетона / И. Б. Удачкин // Строительные материалы. – 2002. – № 3. – С. 8–9.
5. Урханова, Л. А. Использование вторичного сырья для производства пенобетона / Л. А. Урханова // Строительные материалы. – 2008. – № 1. – С. 34–35.
6. Безрукова, Т. Ф. Добавки в ячеистый бетон / Т. Ф. Безрукова. – М.: ВНИИЭСМ, 1990. – 37 с.
7. Сердюк, В. Р. Интенсификация структурообразования и твердения ячеистых бетонов / В. Р. Сердюк, С. Г. Вахитов // Промышленность строительных материалов. Сер. 8: Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих. – 1983. – Вып. 11. – С. 13–15.
8. Василевская, Н. Г. Цементные композиции, дисперсно-армированные базальтовой фиброй / Н. Г. Василевская, И. Г. Енгджиевская, И. Г. Калугин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 3. – С. 153–158.
9. Василевская, Н. Г. Управление структурой ячеистых фибробетонов / Н. Г. Василевская, И. Г. Енгджиевская, И. Г. Калугин // Известия вузов. Строительство. – 2010. – № 11–12. – С. 17–20.
10. Голуков, С. А. Модификация плиточных клеев редисперсными полимерными порошками VINNAPAS / С. А. Голуков // Строительные материалы. – 2004. – № 3. – С. 47–49.

Поступила 26.09.2014

REFERENCES

1. Leonovich, S. N., Sviridov, D. V., Belanovich, A. L., Shchukin, G. L., Savenkov, V. P., & Karpushenkov, S. A. (2012) Extension of Mortar Mix Validity. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], 10, 74–77 (in Russian).
2. Savenko, V. P., Shchukin, G. L., Leonovich, S. N., Sviridov, D. V., Belanovich, A. L., Radiukevich, P. I., & Karpushenkov, S. A. (2012) *Method for Obtaining Curing Accelerator for Concrete and Construction Mortars*. Patent Republic of Belarus No 18077 (in Russian).
3. Velichko, E. G., & Komar, A. G. (2004) Prescribed and Technological Problems of Foam-Concrete. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], 3, 26–29 (in Russian).
4. Udachkin, I. B. (2002) Critical Challenges for Development of Foam-Concrete Production. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], 3, 8–9 (in Russian).
5. Urkhanova, L. A. (2008) Usage of Recyclable Materials for Foam-Concrete Production. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], 1, 34–35 (in Russian).
6. Bezrukova, T. F. (1990) *Additives for Cellular Concrete*. Moscow, VNIIESM. 37 p. (in Russian).
7. Serdiuk, V. R., & Vakhitov, S. G. (1983) Intensification of Structure Formation and Curing of Cellular Concrete. *Promyshlennost Stroitelnykh Materialov. Seriya 8. Promyshlennost Avtoklavnykh Materialov i Mestnykh Viazhushchikh* [Industry of Construction Materials. Series 8. Industry of Autoclave Materials and Local Binders], 11, 13–15 (in Russian).
8. Vasilevskaya, N. G., Engdzhievskaya, I. G., & Kalugin, I. G. (2011) Cement Compositions Continuously Reinforced by Basalt Fiber. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta* [Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building], 3, 153–158 (in Russian).
9. Vasilevskaya, N. G., Engdzhievskaya, I. G., & Kalugin, I. G. (2010) Control Over Structure of Cellular Fibre Concrete. *Izvestiia Vuzov. Stroitelstvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 11–12, 17–20 (in Russian).
10. Golukov, S. A. (2004) Modification of Brick Glue by VINNAPAS-Redispersible Polymer Powder. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials], 3, 47–49 (in Russian).

Received 26.09.2014

ОБ ОЦЕНКЕ ФИЗИЧЕСКОГО ИЗНОСА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗДАНИЙ

Докт. техн. наук, проф. ОСИПОВ С. Н.¹⁾, ПОЗДНЯКОВ Д. А.¹⁾

¹⁾ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)

E-mail: up-niptis@rambler.ru

Предложен способ оценки предельно допустимой и текущей степеней физического износа элементов зданий на базе второй теории прочности по критерию наибольших линейных деформаций с учетом уменьшения величины модуля упругости в случае проявления ползучести материала, который направлен на практическую оценку динамики значенной вероятности отказа или разрушения элемента здания в процессе эксплуатации в течение срока службы.

Для оценки физического износа упругопластических элементов зданий производят измерения по внешним признакам роста деформации, определяют среднюю деформацию в начале эксплуатации и через определенный промежуток времени, величину предельно допустимой полной относительной деформации, характеризующей предельно допустимый износ элемента с учетом пластичности. Далее, по разности средних величин начальной и предельно допустимой деформаций с учетом пластичности по вероятности отказа или условиям сопряжения с другими элементами здания путем деления этой разности деформаций на 100 % износа формируют процентную шкалу износа, а путем деления этой разности деформаций на величину срока службы элемента – временную шкалу износа, характеризующие меру износа элемента здания за счет роста вероятности его разрушения. При этом «ветхий» период эксплуатации строительных элементов и конструкций не должен входить в паспортный срок службы, который в первую очередь должен гарантировать необходимый уровень безопасности.

Ключевые слова: здание, упругопластические элементы, физический износ, вероятностная оценка, линейные деформации, срок службы, вероятность отказа.

Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

ON ASSESSMENT OF DILAPIDATION IN ELASTO-PLASTIC ELEMENTS OF BUILDINGS

OSIPOV S. N.¹⁾, POZDNIAKOV D. A.¹⁾

¹⁾Republican Unitary Enterprise “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.”
(Minsk, Republic of Belarus)

The paper proposes a method for assessment of threshold limit and current rates of dilapidation in building elements which is based on the second strength theory. The method is realized in accordance with the criteria of the maximum linear deformations and with due account of reduction in elasticity module value when material creeping occurs. The method is directed on practical assessment of dynamics pertaining to the values of rejection probability or destruction of building elements in the process of its operation during the period of its life cycle.

In order to assess dilapidation in elasto-plastic elements of buildings it is necessary to make measurements of deformation growth according to external features, determine average deformation at the beginning of building operation and in specified period of time, threshold limit values of complete relative deformation that characterizes maximum allowable element dilapidation with account of plasticity. Further, a percentage dilapidation scale has been formed on the basis of remainder between average values of initial and threshold limit deformations and with due consideration of plasticity, rejection probability or conjugate conditions with other building elements. So in order to form the percentage dilapidation scale the deformation remainder has been divided by 100 % dilapidation and temporary dilapidation scale has been formed when the remainder is divided by value of element service life. The scales reflect dilapidation rate of the building element through probability growth of its destruction. In this context dilapidated operational period of construction elements and structures should not be included in their rated service life which firstly should guarantee the required security level.

Keywords: building, elasto-plastic elements, dilapidation, probabilistic assessment, linear deformations, service life, rejection probability.

Fig. 3. Tab. 1. Ref.: 10 titles.

До настоящего времени используется способ оценки физического износа жилых зданий [1, 2], включающий понятие физического износа конструкции, элемента, системы инже-

нерного оборудования и здания в целом, под которым понимается утрата первоначальных технико-эксплуатационных качеств (прочности, устойчивости, надежности и др.) в результате

воздействия природно-климатических факторов и жизнедеятельности человека. Физический износ на момент его оценки в [1] выражается соотношением стоимости объективно необходимых ремонтных мероприятий, устраняющих повреждения конструкции, элемента, системы или здания в целом, и их восстановительной стоимости.

Таким образом, способы оценки, приведенные в [1, 2], в значительной степени определяют не физический (уменьшение прочности, устойчивости, надежности и т. п.), а стоимостной износ, при котором 100 % износа наступает при достижении стоимости объективно необходимых ремонтных мероприятий, устраняющих повреждения конструкций, элемента, системы или здания в целом, стоимости новых, неповрежденных объектов и их встраивания в систему или здание в период обследования. Таким образом, данная величина износа зависит от сложившихся в период обследования рыночных цен на строительные изделия, материалы и ремонтные работы. Поэтому способ оценки [1] так называемого физического износа к физике процесса потери прочности строительных изделий и конструкций имеет весьма косвенное отношение, а определение термина «физический износ» (здания, элемента) не полностью соответствует содержанию смысла этого термина. Однако данный термин используется в [1, 2] в качестве характеристики процесса ухудшения показателей эксплуатационных качеств здания, его отдельных элементов во времени с учетом изменяющихся требований к ним. В соответствии с [2, с. 3–32] физический износ конструкций и элементов жилых зданий качественно зависит от многих показателей (площади повреждений, ширины и количества трещин, выпучивания, прогиба, глубины разрушения и выветривания швов, отклонения от вертикали и др.) и оценивается в процентах. При этом максимальные величины износа достигают 80 %.

Для некоторых видов слоистых конструкций и элементов систем инженерного оборудования в [2, с. 36–39, Приложение Б] приведены графики зависимостей изменения физического износа (%) в течение срока эксплуатации (годы). Эти графики легко привести к более удобному виду (рис. 1), где показаны

графические зависимости физического износа Φ (%) слоистых конструкций со сроком службы 10–50 лет от времени эксплуатации $T_{\text{экс}}$ (годы). На графике семь кривых, соответствующих физическому износу за сроки службы 10, 12, 15, 20, 30, 40 и 50 лет, обозначенных в верхней части рис. 1. Для всех этих кривых, как и для остальных, приведенных в [2, с. 36–39], характерен двойной перегиб: первый – в начальном периоде эксплуатации и второй – в период примерно 70–80 % срока службы, который соответствует 40–50 % полного физического износа. Пунктирные линии на рис. 1 являются касательными к кривым относительного износа в точках начала вторых перегибов, а тангенсы углов наклона пунктирных прямых соответствуют значениям их производных в этих точках.

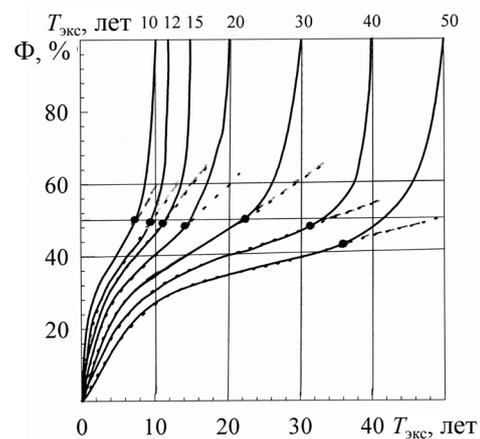


Рис. 1. Зависимость физического износа Φ слоистых конструкций от времени эксплуатации $T_{\text{экс}}$

Известен способ оценки морального износа здания (элемента) [3, Приложение 1], который характеризуется степенью несоответствия основных параметров, определяющих условия проживания, объем и качество предоставляемых услуг, современным требованиям. Этот способ незначительно влияет на безопасность функционирования здания, хотя зачастую играет существенную и даже решающую роль при выборе вида ремонта, модернизации и реконструкции.

Известен способ оценки физического износа здания (элемента), приведенный в [3, Приложение 1], где сказано, что «физический износ здания (элемента) – величина, характеризующая степень ухудшения технических и связанных

с ними других эксплуатационных показателей здания (элемента) на определенный момент времени». Такое определение термина «физический износ» имеет всеобъемлющий качественный характер без описания конкретных возможных количественных оценок, которые необходимы для принятия технических решений.

Таким образом, используемые в настоящее время [1–3] определения понятий морального и физического износа не дают реальной оценки износа элемента здания и здания в целом в реальном масштабе времени.

В [4] за основной показатель износа элемента здания принято повышение вероятности его отказа или разрушения с течением времени, определяемой уменьшением среднего показателя прочности и изменением плотности распределения значений прочности. Использование необходимой величины показателя прочности в зависимости от наибольших напряжений позволяет отнести этот способ вероятностной оценки физического износа здания [4] к первой теории прочности, в основе которой лежит критерий наибольших нормальных напряжений.

Как отмечено в [5, с. 180], опытная проверка показывает, что первая теория прочности не отражает условий перехода материала в пластическое состояние, что является недостатком [4], так как основные строительные материалы характеризуются существенной пластичностью.

К задачам предлагаемого способа вероятностной оценки износа упруго-пластичных элементов зданий относятся:

- разработка вероятностной оценки физического износа элементов зданий на базе второй теории прочности по критерию наибольших линейных деформаций [5, с. 181] с учетом уменьшения величины модуля упругости в случае проявления ползучести материала;
- оценка динамики значений вероятности отказа или разрушения элемента здания в процессе эксплуатации в течение срока службы;
- разработка шкалы оценки степени физического износа элементов здания.

Технический результат, соответствующий указанным задачам, достигается посредством использования в качестве показателя износа элемента здания величины повышения вероятности его отказа или разрушения за известный промежуток времени, определение средней де-

формации в начале эксплуатации и через определенный промежуток времени, установление величины начальной и предельно допустимой за весь срок службы вероятности отказа элемента. При этом величину предельно допустимой полной относительной деформации, характеризующей полный износ элемента, с учетом пластичности определяют по значениям ε_i или Φ по соответствующим неравенствам:

$$\frac{d\varepsilon_{i+1}}{dT_{i+1}} > \frac{d\varepsilon_i}{dT_i} \text{ при } \varepsilon_{\text{пр}} < K_{\text{п}}\varepsilon_{\text{у}}, \quad (1)$$

$$\text{или } \frac{d\Phi_{i+1}}{dT_{i+1}} > \frac{d\Phi_i}{dT_i},$$

где $d\varepsilon_i/dT_i$ – первая производная изменения относительной деформации ε_i в момент времени T_i после начала эксплуатации элемента здания; $d\varepsilon_{i+1}/dT_{i+1}$ – то же в следующий момент времени; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – предельно допустимая полная относительная деформация; $K_{\text{п}}$ – коэффициент пластичности; $\varepsilon_{\text{у}}$ – предельная упругая относительная деформация; $d\Phi_i/dT_i$ – первая производная изменения относительной величины физического износа Φ_i в момент времени T_i после начала эксплуатации элемента здания; $d\Phi_{i+1}/dT_{i+1}$ – то же в следующий момент времени.

За расчетное предельно допустимое значение полной относительной деформации $\varepsilon_{\text{пр}}$ или износа $\Phi_{\text{пр}}$ принимают среднюю величину из полученных по приведенной выше формуле в результате необходимого количества измерений или из условий сопряжения с другими элементами здания. Полученное среднее значение $\varepsilon_{\text{пр}}$ или $\Phi_{\text{пр}}$ делят на процентную или временную величину безопасного срока службы элемента и формируют процентную и временную шкалы, характеризующие меру износа элемента здания за счет роста вероятности его разрушения. Здесь за предельно допустимый износ, соответствующий предельно допустимой деформации, принята часть полного износа, так как 100%-й износ означает 100%-ю вероятность разрушения строительного элемента. Такие же проценты износа заложены в [1, 2] для полной замены строительных элементов, изделий и конструкций.

Явление полного физического износа (разрушения) твердого, но достаточно пластичного материала при растяжении сопровождается удлинением, которое характеризует пластичность материала [5, с. 95]. В зависимости от

величины этого удлинения (δ) материалы условно делятся на пластичные ($\delta > 5\%$) и хрупкие ($\delta < 5\%$). Например, для углеродистой стали марки Ст.2 относительное удлинение после разрыва $\delta \approx 31\%$. Для простой оценки пластичности горных пород используются коэффициенты пластичности [6, с. 78, табл. 2.22], которые характеризуют соотношение между полной и упругой деформациями до момента разрушения. Из приведенных в [6] данных следует, что для бентонита (модуль Юнга $E \rightarrow 0$) коэффициент пластичности K_n стремится в бесконечность ($K_n \rightarrow \infty$), а для кварцита при $E = 7,5 \cdot 10^4$ МПа $K_n = 1,0$, т. е. в этом случае пластичность отсутствует. Из этих данных следует, что с ростом модуля упругости пород величина K_n имеет тенденцию к уменьшению.

Однако приведенные данные характерны для материалов при относительно быстром разрушении. При длительном (десятки, а иногда и сотни лет) воздействии различных видов напряжений на элемент здания проявления пластичности могут существенно усиливаться и выражаться в значительной ползучести. Особенно существенно процесс ползучести может со временем проявляться в различных грунтах [7], что важно для устойчивости фундаментов, а также выработок в горных породах [8, с. 23, рис. 2].

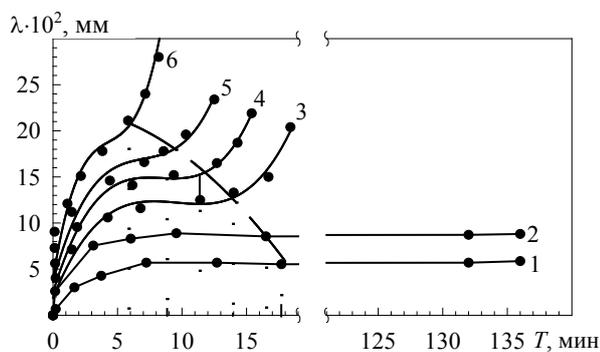


Рис. 2. Зависимость ползучести юрской глины от нагрузки

В качестве примера на рис. 2 [7, рис. 5.13а] приведены кривые ползучести юрской глины в зависимости от нагрузки, характеризуемой долей от условно-мгновенной (испытание образца за 0,5–1,0 мин) прочности (кривые 1–6 соответственно: $0,530\tau_{пр}$; $0,575\tau_{пр}$; $0,590\tau_{пр}$; $0,600\tau_{пр}$; $0,630\tau_{пр}$ и $0,700\tau_{пр}$, где λ — деформация; $\tau_{пр}$ — предельная прочность на сдвиг). При нагрузках $\tau \leq 0,575\tau_{пр}$ деформации были затухающими, а при $\tau \geq 0,575\tau_{пр}$ возникла незатухающая пол-

зучесть, заканчивающаяся разрушением. Процесс явного разрушения практически начинается с момента перегиба кривой в соответствии с приведенной выше формулой. При этом необходимо учесть, что даже постоянная ползучесть (кривые 1 и 2) может заканчиваться разрушением материала вследствие нарастания степени поврежденности материала [7, с. 316]. Использование экспериментальных данных, приведенных в [3, табл. 10.1] для времени перехода к разрушению (T_p) каолиновых образцов, дает хорошую линейную аппроксимацию в полулогарифмической системе координат в виде

$$\text{Lg}T_p = a_1 - b_1\sigma \quad \text{при } 10 \leq \sigma \leq 17, \quad (2)$$

где a_1 , b_1 — эмпирические константы; σ — напряжение.

В результате статистической обработки при корреляционном отношении $\eta = 0,99$ значения эмпирических констант $a_1 = 9,34$ и $b_1 = 0,65$ (при σ в кПа и T_p в ч). Необходимо отметить, что при увеличении напряжения в 1,7 раза (с 10 до 17 кПа) время перехода к разрушающей деформации уменьшается примерно в 10^3 раз.

Как указывает С. С. Вялов [7, с. 145], например у металлов разброс опытных данных при испытании на ползучесть в пределах 20% не считается чрезмерно большим. При таком разбросе характеристик ползучести при распределении плотности вероятности, похожей на нормальный закон, коэффициент вариации составляет примерно $K_v = 0,12-0,15$. Для других строительных материалов и пород такой коэффициент вариации возрастает до $K_v = 0,2-0,3$, что приводит к необходимости увеличения запаса прочности или эквивалентного уменьшения вероятности отказа элемента здания. Например, по приведенным в [8, табл. 2] экспериментально-расчетным параметрам ползучести при использовании линейной теории наследственности авторы произвели комплекс расчетов, в результате которых удалось определить значения коэффициентов вариации при длительной деформации образцов мергеля, отобранного на глубине 378 м Старобинского месторождения калийных солей. Так, при нагрузке $0,3\sigma_{пр}$ ($\sigma_{пр}$ — предельная величина прочности на сжатие) коэффициенты вариации величин деформаций, принятых при $T_{экс} = 0$ за начало отсчета, увеличиваются с ростом времени от 1 до 10 ч от 0,008–0,014 до 0,075–0,114,

т. е. примерно на порядок. При $0,5\sigma_{пр}$ коэффициент вариации с течением времени изменялся от 0,101–0,340 до 0,145–0,380. Таким образом, с ростом нагрузки разброс значений ползучести мергеля со средней предельной прочностью $\bar{\sigma}_{пр} = 2,635$ МПа во времени существенно увеличивается и может достичь $K_v = 0,3–0,4$. Для более прочных материалов величина K_v уменьшается.

Результаты испытаний на одноосное сжатие образцов горных пород (уплотненные глины, аргиллиты, алевролитовые аргиллиты, алевролиты, песчанистые сланцы и песчаники) показали [8, с. 21–23], что отношение деформации ползучести к мгновенным деформациям находится в пределах 10–139 %. На нескольких образцах удалось проследить период, характеризующийся ростом скорости ползучести накануне разрушения подобно кривым 3–6 на рис. 2, что аналогично ускорению относительного физического износа, показанного графически на рис. 1, после точек касания пунктирных прямых с увеличением времени эксплуатации элемента здания.

Необходимо отметить, что согласно с СНБ 1.04.01–04 [9, с. 2] ветхое состояние соответствует физическому износу со стенами из каменных материалов более 70 %, из дерева и прочих материалов – 65 %, что примерно соответствует принятой в Российской Федерации норме повреждений (износа) в 75 %, при которой восстановление здания нецелесообразно. Однако в разделе 8.15 [9, с. 16] сказано, что критическому дефекту при оценке несущих свойств конструкций соответствует нормируемое численное значение износа $\Delta > 40$ %, а согласно [10], критический дефект – это «дефект, при наличии которого использование продукции по назначению практически невозможно или недопустимо», т. е. требует немедленного ремонта. В разделе 8.2 [9, с. 18] сказано, что эксплуатация здания запрещается, если оно признано ветхим.

В Приложении Е к [2, с. 43] рекомендуется математическая модель определения физического износа зданий и сооружений в целом в виде линейной зависимости износа от срока службы, что неверно в соответствии с кривыми на рис. 1 и аналогичными для других элементов и систем здания.

Как отмечено в [10, с. 438–442], если элемент работает на кручение или изгиб, то появление в крайних волокнах какого-либо сечения

предельных напряжений еще не означает потери несущей способности элемента, так как напряжения остальных волокон сечения ниже предельных, что характерно для строительных конструкций. Для таких конструкций правилен расчет по предельным состояниям, одно из которых – проявление чрезмерных деформаций, нарушающих безопасную эксплуатацию конструкции. В предельном состоянии изгибаемой балки нормальные напряжения по всему сечению достигают предела текучести, в результате чего предельный изгибающий момент, соответствующий распространению ползучести материала по всему сечению, зависит от пластического момента сопротивления сечения. Поэтому изгиб балки до предельного состояния является упругопластическим.

Для деревянных неоштукатуренных перекрытий [2, с. 12] прогиб балок и настилов до 1/50 пролета соответствует величине физического износа до 40 %, прогиб балок и прогонов до 1/10 пролета – физическому износу в 41–60 %, то же до 1/5 пролета – 61–70 %. Прогиб потолка до 1/100 пролета соответствует 61–70 % физического износа. Величина прогиба перекрытия из различных видов железобетонных панелей также является главным признаком значительного физического износа [2, с. 13]. Так, прогиб до 1/50–1/80 пролета характерен для износа 51–80 %.

Более сложная задача – учет ползучести различных элементов зданий в их силовой и конструктивной взаимосвязи. Здесь особенно важен учет предельно допустимой пластичности различных материалов, например железобетона–дерева–штукатурки и т. п. Для таких разных материалов параметры ползучести с течением времени могут отличаться в разы.

Необходимо отметить, что определение критических дефектов, как и других прочностных и физических характеристик элементов зданий, в значительной степени имеет стохастический характер, что требует учета возможного вероятностного разброса, характеристикой которого может служить коэффициент вариации K_v , при оценке параметров ползучести, например песчаников и песчанистых сланцев, составляющий [8, с. 24] $K_v = 0,22–0,28$, прочности бетона – до $K_v = 0,20–0,25$. Поэтому если принять среднюю величину предельного физического износа жилого здания до необходимости выселения жильцов или проведения капи-

тального ремонта $\bar{\Phi}_{из} \approx 50\%$ и $K_B = 0,20-0,25$, то предельный износ Φ_{max} с вероятностью 0,05 (5 %) (что соответствует надежности $N \approx 0,95$ (95 %) при показателе достоверности $t = 1,64$ [4]) составляет

$$\Phi_{max} = \bar{\Phi} + tK_B \approx 0,5 + 1,64 \cdot (0,20 \dots 0,25) = 0,83 \dots 0,91, \text{ или } 83 \dots 91\%, \quad (3)$$

а минимальный износ при $\bar{\Phi}_{из} \approx 0,4$ (40 %) будет $\Phi_{min} \approx 0,73 \dots 0,81$, или 73...81 %.

Эти значения возможного износа полностью соответствуют ветхому состоянию элементов здания. Таким образом, величина физического износа в точке (рис. 1, точки на кривых линиях) начала второго изгиба зависимости $\Phi = f(T_{экс})$

(где $\frac{d\Phi_{i+1}}{dT_{i+1}} > \frac{d\Phi_i}{dT_i}$) может служить верхней

предельно допустимой границей физического износа элементов зданий или конструкций, что можно принять за 100 % условного износа аналогично [4]. Однако в данном предложении эта допустимая величина физического износа является характерным значением для каждого конкретного строительного элемента и, следовательно, реальный масштаб условного износа изменяется, чего нет в [4], где это значение было закреплено на $\Phi = 50\%$.

Следовательно, кривые зависимостей условного физического износа Φ_y строительных элементов от времени эксплуатации $T_{экс}$ аналогичны приведенным на рис. 1 зависимостям $\bar{\Phi} = f(T_{экс})$ в диапазоне от $T_{экс} = 0$ до $T_{экс, max}$, где $T_{экс, max}$ – время наступления начала второго изгиба. Поэтому оценить величину условного износа за любое время после начала эксплуатации элемента здания можно из эмпирического выражения, соответствующего кривым $\Phi_y = f(T_{экс})$:

$$\Phi_y = \Phi_{y,0} + cT_{экс} - \Phi_{y,0} \exp(-\psi T_{экс}), \quad (4)$$

где $\Phi_{y,0}$ – величина условного износа, соответствующая точке пересечения касательной к предельно допустимой величине износа ($d\Phi_y/dT_{экс}$); c, ψ – эмпирические константы.

Перевод условного физического износа в реально определенный производится через коэффициент $c = \Phi/\Phi_y$, или

$$\Phi = c\Phi_y. \quad (5)$$

Как отмечено выше, 100%-у условному физическому износу элементов здания соответствует 5%-я вероятность отказа. Следовательно, 1 % условного износа в среднем соответствует $5/100 = 0,05\%$ -й вероятности отказа или разрушения при равномерной плотности распределения вероятности. При нормальном законе распределения плотности вероятности 1 % условного износа соответствуют разные величины вероятности отказа в зависимости от времени эксплуатации элемента с самого начала.

В качестве примера приведем расчет оценки физического износа упругопластической слоистой конструкции с официальным сроком службы до $T = 30$ лет и средним предельно допустимым износом $\bar{\Phi} = 50\%$.

Для выполнения расчетов на рис. 3 приведена кривая нарастания относительного физического износа слоистой конструкции [2, с. 38] со сроком службы 30 лет, у которой точка начала второго перегиба (рис. 1) соответствует 50 % физического износа, принимаемого для относительной шкалы $\Phi_{от}$ за 100 %. Нарастание относительного физического износа $\Phi_{от}$ для этой слоистой конструкции приведено на рис. 3 в виде сплошной кривой, которая заканчивается в точке начала второго перегиба физического износа. Пунктирная линия на рис. 3 соответствует первой производной $d\Phi/dT_{экс}$ в точке начала второго перегиба, а также является касательной к кривой нарастания физического износа.

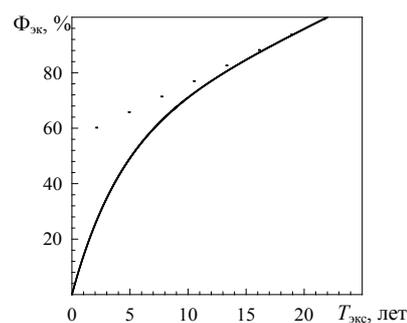


Рис. 3. Нарастание относительного физического износа слоистой конструкции

Для аналитической аппроксимации сплошной кривой (рис. 3) наиболее подходящим является выражение

$$\Phi_{от} = \Phi_{от,0}(1 - \exp(-\psi T_{экс})) + cT_{экс}, \quad (6)$$

где $\Phi_{от,0}$ – величина относительного физического износа в точке пересечения касательной (пунктирная линия на рис. 3) к кривой $\Phi_{от} =$

$= f(T_{\text{экс}})$ в точке начала второго перегиба с вер-тикальной шкалой $\Phi_{\text{от}}$, %; ψ – эмпирический коэффициент показателя экспоненты, год⁻¹; $T_{\text{экс}}$ – время (продолжительность) эксплуатации, лет; c – тангенс угла наклона касательной (пунктирная кривая на рис. 3), соответствующий величине $(100 - \Phi_{\text{от.о}})/T_{\text{экс.л}}$; $T_{\text{экс.л}}$ – время эксплуатации до наступления $\Phi_{\text{от.о}} = 100$ %, лет.

В результате количественных расчетов по аппроксимации выражения (6) получено $\Phi_{\text{от.о}} = 56$ %, $\psi = 0,24$ год⁻¹ и $c = 2$ %/год. Следует отметить, что предлагаемая форма аппроксимации обеспечивает соответствие графическим изображениям относительного физического износа различных строительных элементов [2] с точностью в пределах $\pm(2-3)$ % износа, что для практических целей вполне приемлемо.

Результаты определений величин относительного физического износа за различные периоды эксплуатации рассматриваемой слоистой конструкции приведены в табл. 1.

Таблица 1

$T_{\text{экс}}$, лет	5	10	15	20	22
$\Phi_{\text{от}}$, %	50	72	86	96	100

Следует отметить, что 100%-й относительный физический износ, соответствующий понятию ветхого состояния, наступает через 22 года эксплуатации, что составляет примерно 73 % заявленного срока службы строительного элемента.

ВЫВОД

«Ветхий» период эксплуатации строительных элементов и конструкций не должен входить в паспортный срок службы, который в первую очередь должен гарантировать необходимый уровень безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила оценки физического износа жилых зданий: ВСН 53-86(р). – Введ. 01.07.1987. – М.: Госкомитет по гражданскому строительству и архитектуре при Госстрое СССР, 1986. – 72 с.
2. Здания и сооружения. Оценка степени физического износа: ТКП 45-1.04-119–2008 (02250). – Введ. 01.03.2009. – Минск: Минстройархитектуры, 2009. – 44 с.
3. Положение об организации и проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания зданий, объектов коммунального и социально-культурного назначения: ВСН 58-88(р). – Введ. 01.07.1989. – М.: Госкомитет по архитектуре и градостроительству при Госстрое СССР, 1990. – 32 с.

4. Способ вероятностной оценки физического износа элементов зданий: пат. 018263 Евразийский: МПК E04H 1/00 (2006.01) / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко; дата публ. 28.06.2013.

5. Сопrotивление материалов / Г. С. Писаренко [и др.]. – Киев: Выщ. шк., 1973. – 672 с.

6. Смычник, А. Д. Пособие по инженерным расчетам в горном деле (Инженерная геомеханика) / А. Д. Смычник, В. С. Усенко, Г. А. Щербаков. – Минск: Майнио, 2007. – 264 с.

7. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. – М.: Высш. шк., 1978. – 448 с.

8. Глушко, В. Т. Механика горных пород и охрана выработок / В. Т. Глушко, А. З. Широков. – Киев: Наук. думка, 1967. – 164 с.

9. Здания и сооружения. Основные требования к техническому состоянию и обслуживанию строительных конструкций и инженерных систем, оценке их пригодности к эксплуатации: СНБ 1.04.01–04. – Минск: Минстройархитектуры, 2004. – 20 с.

10. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 15467–79. – М.: Госстандарт, 1987. – 28 с.

Поступила 23.06.2015

REFERENCES

1. VSN 53-86(p) [Departmental Building Codes]. Regulations for Assessment of Physical Wear of Residential Buildings. Moscow, State Committee on Civil Construction and Architecture Attached to USSR Gosstroy, 1986. 72 p. (in Russian).

2. ТКП 45-1.04-119–2008 (02250) Buildings and Structures. Assessment of Physical Wear Rate. Minsk, Minstroyarkhitektury, 2009. 44 p. (in Russian).

3. VSN 58-88(p) [Departmental Building Codes]. Statute on Organization and Execution of Reconstruction, Repair and Maintenance of Buildings, Communal, Social and Cultural Objects. Moscow, State Committee on Civil Construction and Architecture Attached to USSR Gosstroy, 1990. 32 p. (in Russian).

4. Osipov, S. N., & Pilipenko, V. M. (2013) *Method for Probabilistic Assessment of Physical Wear of Building Elements*. Eurasian Patent Office No 018263 (in Russian).

5. Pisarenko, G. S., Agarev, V. A., Kvitka, A. L., Popkov, V. G., & Umanskii, E. S. (1973) *Resistance of Materials*. Kiev, Vysshaya Shkola. 672 p. (in Russian).

6. Smychnik, A. D., Usenko, V. S., & Shcherbakov, G. A. (2007) *Textbook for Engineering Analysis in Mining (Engineering Geomechanics)*. Minsk, Publishing House “Maynio”. 264 p. (in Russian).

7. Vyalov, S. S. (1978) *Rheological Principles of Soil Mechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola. 448 p. (in Russian).

8. Glushko, V. T., & Shirokov, A. Z. (1967) *Mechanics of Geological Material and Protection of Mine Workings*. Kiev, Naukova Dumka. 164 p. (in Russian).

9. СНБ 1.04.01–04 [Building Norms of Belarus]. Buildings and Constructions. Main Requirements to Technical Conditions and Maintenance of Construction Structures and Engineering Systems, Assessment of their Operational Capability. Minsk, Minstroiarhitektury, 2004. 20 p. (in Russian).

10. State Standard 15467–79. Control over Product Quality. Basic Concepts. Terms and Definitions. Moscow, Publishing Standards, 1987. 28 p.

Received 23.06.2015

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Канд. техн. наук, доц. ЗЕМЛЯКОВ Г. В.¹⁾

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

E-mail: zemliakov@bntu.by

В настоящее время при возведении монолитных бетонных и железобетонных конструкций основные показатели качества зависят от структурообразования и твердения бетона, особенно в зимних условиях. Поэтому режим тепловой обработки влияет на свойства бетона, характеризующие его прочность, пористость, долговечность, морозостойкость и др. В этой связи выбор режимов и их корректировки целесообразно отрабатывать на моделях. Удобство математического моделирования заключается в воспроизведении процесса функционирования во времени. Однако явные математические соотношения получаются только для сравнительно простых систем или ценой определенных предположений и допущений. В связи с этим целесообразно использовать наряду с математическим и физическое моделирование путем изготовления, тепловой обработки и испытания опытных образцов.

Создание эффективной, научно обоснованной технологии тепловой обработки монолитного бетона невозможно без информационного обеспечения и производственных условий. В разработанной математической модели тепловой обработки монолитных конструкций определена последовательность выполнения некоторых операций. Определяли формы, геометрические размеры, площадь. Для проведения расчетов режимов тепловой обработки вводили необходимые теплотехнические характеристики опалубочных систем бетонизируемых конструкций. Модель учитывала три основных стадии тепловой обработки: подъем температуры, изотермический прогрев и остывание. Приведены формулы их определения, в том числе общий расход теплоты: на подъем температуры бетонной смеси, для прогрева 1 м^3 бетонной смеси, в результате экзотермической реакции цемента на 1 м^3 , для нагрева арматуры на 1 м^3 , на испарение влаги, для нагрева опалубочной системы. Определены потери теплоты: в окружающую среду, в процессе прохождения через наружную поверхность опалубки, при подъеме температуры одного конструктивного элемента и 1 м^3 его бетонной смеси. Показано определение часового расхода теплоты на подъем температуры бетонной конструкции в целом.

Предложенная методика позволяет определить требуемые параметры процесса тепловой обработки бетонных смесей, оптимизировать режимы тепловой обработки, быстро корректировать создавшуюся ситуацию, автоматизировать процесс и при необходимости сопоставлять отдельные решения в виде графиков и диаграмм.

Ключевые слова: показатель качества, тепловая обработка, бетон, моделирование, количество теплоты, теплотехнические расчеты.

Библиогр.: 10 назв.

MODELING OF CONCRETE THERMAL TREATMENT IN CAST-IN-SITU STRUCTURES

ZEMLYAKOV G. V.¹⁾

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

Nowadays main qualitative indices depend on concrete structure formation and curing while constructing cast-in-situ concrete and reinforced concrete structures and especially it concerns winter conditions. Therefore the regime of thermal treatment influences on concrete properties characterizing its strength, porosity, durability, frost resistance etc. In this connection selection of regimes and their corrections are reasonable to be tested while using models. Convenience in mathematical modeling is in reproduction of the operational process in time. However explicit mathematics is obtained only for relatively simple systems or at the cost of specific assumptions and suppositions. In this connection it is expedient to use physical simulation along with mathematical one. The physical simulation presupposes manufacturing, thermal treatment and testing of prototype models.

Development of efficient, scientifically-substantiated technology for thermal treatment of cast-in-situ concrete is impossible without information support and working environment. The proposed mathematical model of thermal treatment for cast-in-situ structures determines sequence of the operations to be executed. Shapes, geometric dimensions, surface area have been determined in the paper. The required thermotechnical characteristics of formwork systems for structures under concreting have been used for making calculations of thermal treatment regimes. The model has taken into account three main stages of thermal treatment: temperature rising, isothermal warming and cooling. The paper provides formulae for their determination including total heat expenditure: for temperature rising of the concrete mix, for thermal treatment of 1 м^3 concrete mix, for cement exothermic reaction per 1 м^3 , for reinforcement heating per 1 м^3 , for moisture evaporation, for heating of form-

work system. The following heat losses have been determined: in the environment, in the process of passing through the exterior surface of the formwork, in case of temperature rising in one of the constructive element and per 1 m³ of its concrete mix. The paper reveals determination of hourly heat consumption for a concrete structure as a whole.

The proposed methodology makes it possible to determine the required characteristics of heat treatment process for concrete mixes, to optimize regimes of heat treatment, promptly to make corrections in the created situation, to automatize the process and when it is necessary to make comparison of some solutions in the form of graphics and diagrams.

Keywords: quality parameter, heat treatment, concrete, modeling, heat amount, thermo-technical calculations.

Ref.: 10 titles.

Основные показатели качества монолитных бетонных и железобетонных конструкций в значительной степени зависят от свойств, приобретаемых в процессе структурообразования и твердения бетона. Эта зависимость в полной мере проявляется в процессе тепловой обработки монолитного бетона в зимних условиях. От режима тепловой обработки во многом зависят показатели, характеризующие прочность, пористость, долговечность, морозостойкость и другие свойства бетона. От выбранных параметров тепловой обработки зависят также виды и величины затрат энергоресурсов [1–4]. Определение оптимального режима при наличии большого количества факторов, влияющих на процесс прогрева, – сложная задача. Кроме того, рассматриваемая система является вероятностной, что часто требует изменения намеченного режима в ходе тепловой обработки. В этой связи все операции по выбору мероприятий [5] режимов и возможной их корректировки целесообразно обрабатывать на моделях.

Обычно модель представляет собой физический или абстрактный объект, который в большей или меньшей степени отражает процессы, происходящие в реальной системе. Моделирование можно рассматривать как замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели [6]. Степень соответствия свойств и характеристик модели свойствам и характеристикам системы определяется ее адекватностью. Адекватность модели, отражающей технологические особенности монолитного бетонирования в зимних условиях, зависит от многих условий и факторов, основными из которых являются:

- степень полноты и достоверности сведений об исследуемой системе;
- учет воздействия элементов и связей модели на конечные результаты, определяемые целью системы;

- степень детализации модели.

Модели, отображающие процесс твердения бетона, в зависимости от представления системы и способа их реализации могут быть физическими и информационными, в том числе математическими.

Физические модели – это «материальные» модели, эквивалентные или подобные в той или иной степени системе. В общем случае физические модели – модели, процесс функционирования которых такой же, как у оригинала, имеет ту же или подобную физическую природу [7]. Математические модели – это «абстрактные» модели, представляющие собой формализованное описание изучаемой системы с помощью абстрактного языка, в частности с помощью математических символов и соотношений (алгебраических, дифференциальных, логических и т. д.), отображающих процесс функционирования системы.

Для изучения системы, имитирующей процесс твердения монолитного бетона в зимних условиях, используются как математические, так и физические модели. Удобство математического моделирования заключается в том, что модель в сжатом виде воспроизводит процесс функционирования системы во времени, причем модель имитирует все элементарные составляющие процесса с обязательным сохранением их взаимосвязанности и взаимообусловленности, логической структуры и последовательности протекания [8]. Большим достоинством аналитического моделирования является возможность детального анализа характеристик системы в широком диапазоне изменения исходных и промежуточных данных. Однако характерные для аналитического моделирования явные математические соотношения удается, как правило, получать только для сравнительно простых систем или ценой определенных предположений и допущений. Такие факторы, как постоянные изменения температуры окружающей

среды, скорости движения воздуха, нестационарный тепловой режим и явления массопереноса в твердеющем бетоне, могут способствовать уменьшению адекватности модели реальной системы приобретения свойств, характеризующих качество монолитного бетона при выполнении работ в зимних условиях. В связи с этим для проведения более детального исследования и проверки адекватности модели наряду с математическим целесообразно использовать физическое моделирование путем изготовления, тепловой обработки и испытания опытных образцов бетона по принятым методикам. Для этой цели используются методы, основанные на разрушении специально взятых образцов: бетонных кубиков, высверленных из конструкции цилиндров, и т. д. Таким образом определяются главные свойства бетона, характеризующие изменение его качественных показателей в зависимости от начального состояния и условий тепловой обработки.

Определение показателей качества бетона с применением разрушающих методов имеет ряд существенных недостатков, основными из которых являются:

- использование крупногабаритных элементов и оборудования, часто требующих применения транспортных средств, грузоподъемных механизмов и специальной оснастки;
- высокая стоимость работ по проведению испытаний;
- большая трудоемкость работ;
- значительная продолжительность проведения работ, например при определении морозостойкости бетона требуется более трех месяцев;
- существенные затраты энергоресурсов на проведение испытаний;
- наличие потерь материалов в виде отходов разрушенных в процессе испытаний образцов, бетонных и железобетонных конструкций;
- сложность, а часто вообще отсутствие возможности получения требуемых объективных и точных показателей качества бетона непосредственно в конструкциях.

Исследования показали, что сложившаяся традиционная система контроля прочностных показателей качества бетона монолитных конструкций, основанная на испытаниях образцов из используемого бетона, не обеспечивает не-

обходимой достоверности. Главной причиной этого является отсутствие практической возможности обеспечить такие же условия твердения для бетона контрольных образцов, какие имеют место для бетона в конструкциях. Использование различных методов тепловой обработки бетона в условиях низких температур воздуха в еще большей степени усиливает эти различия. Очевидно, что данные, получаемые испытанием образцов, твердевших в нормальных условиях лаборатории, могут рассматриваться лишь для оценки качества используемой бетонной смеси, но не бетона готовой конструкции.

Наряду с качественными характеристиками исходных материалов, подбором состава и принятой технологией приготовления, транспортировки, укладки и уплотнения бетонной смеси большое влияние на структуру и эксплуатационные свойства монолитного бетона оказывают методы его тепловой обработки. Данная технологическая стадия характерна тем, что в ходе этого процесса наряду с химическими проходят сложные тепло- и массообменные процессы, оказывающие большое влияние на структурообразование бетона. Интенсивность таких процессов зависит от принятого режима тепловой обработки: она во многом предопределяет конечные физико-технические свойства бетона. Применение определенных режимов теплового воздействия на твердеющую систему оказывает влияние на процесс структурообразования.

Создание эффективной, научно обоснованной технологии тепловой обработки монолитного бетона невозможно без соответствующего информационного обеспечения процесса ее адаптации к конкретным производственным условиям, которые часто носят ярко выраженный вероятностный характер по сравнению с условиями, присущими процессу заводского изготовления сборных железобетонных элементов. Учет факторов, приводящих к снижению показателей качества монолитного бетона, в ряде случаев затруднен по причинам технического, технологического и организационного характеров.

Влияние указанных недостатков в значительной степени может быть ликвидировано или ослаблено за счет использования неразрушающих методов контроля качества на разных

стадиях созревания бетона. В настоящее время ведется большая работа по созданию и внедрению методов и средств неразрушающего контроля качества бетона, отличительные черты которых – экономичность и быстрота. Для определения различных физико-механических характеристик используются методы, основанные на явлениях поглощения ультразвука, использовании инфракрасных, рентгеновских и ионизирующих излучений, а также на принципах магнитной дефектоскопии, лазерной техники и других достижениях науки и техники.

Применение различных методов интенсификации твердения бетона при возведении монолитных конструкций зданий и сооружений требует проведения большого количества расчетов, обеспечивающих оптимальный режим тепловой обработки, для:

- получения бетона, соответствующего заданным характеристикам, в том числе имеющего требуемые механическую прочность и структуру;
- обеспечения набора бетоном прочности в обусловленные сроки;
- использования минимального количества энергоресурсов для тепловой обработки бетона и др.

Проведение комплекса расчетов является сложной трудоемкой работой, поэтому для практических целей часто прибегают к упрощенным методам расчетов или к использованию различного рода таблиц и графиков. Такой подход в некоторой мере себя оправдывает. В то же время часто не полностью учитываются все факторы, влияющие на сложный процесс набора бетоном прочности и приобретение других данных, характеризующих его качественные показатели. Допускаемые при этом погрешности влекут ряд негативных явлений, в том числе снижение качественных характеристик монолитных бетонных конструкций и неоправданный дополнительный расход энергоресурсов.

В настоящее время все строительные организации имеют средства вычислительной техники, которые в основном используются для решения задач учета и отчетности, составления соответствующих отчетных документов. Процесс компьютеризации в сфере управления продолжает развиваться. Возникает необходи-

мость наряду с решением задач учета и отчетности осуществлять более широкий переход к решению вопросов по оптимизации строительного производства. Одной из таких задач является оптимизация режима тепловой обработки монолитных бетонных конструкций, которая может быть решена путем реализации математической модели, разработанной на основе электронных таблиц Excel.

В математической модели для решения задач тепловой обработки монолитных конструкций предусмотрена некоторая последовательность выполнения отдельных операций. Вначале определяются форма и геометрические размеры бетонной или железобетонной конструкции. В простейшем случае для большинства таких конструкций, как колонны, балки, плиты покрытий и перекрытий, ростверки и другие, наиболее распространенной формой является параллелепипед с размерами сторон a , b , l . На основе данных геометрических размеров определяется ряд производных величин, в том числе объем конструктивного элемента V_k , м³:

$$V_k = abl. \quad (1)$$

Кроме того, для проведения теплотехнических расчетов необходимо знать площадь поверхности обогреваемого конструктивного элемента (F_k), а также площади каждой из его сторон, так как для каждой из них условия теплотехнического перехода и теплотехнические параметры опалубочных систем могут существенно различаться. В тех случаях, когда элемент имеет сложную форму, предусматривается расчет его объема или площади производить последовательно: рассчитываются отдельные части простой формы с последующим их суммированием.

Для получения информации о массивности конструкции определяется модуль ее поверхности M_n , м⁻¹:

$$M_n = \frac{F_k}{V_k}. \quad (2)$$

В процессе проведения расчетов режимов тепловой обработки необходимо знание основных теплотехнических характеристик опалубочных систем бетонизируемых конструкций.

Для их расчета вводятся нужные исходные данные, в том числе:

- толщина каждого слоя опалубочной системы (опалубка, тепло- и гидроизоляция, защитный слой) для каждой из сторон бетонируемой конструкции δ_n , м;
- коэффициент теплопроводности материала каждого слоя опалубочной системы каждой из сторон бетонируемой конструкции λ_n , Вт/(м·°C);
- коэффициент теплоотдачи каждой поверхности бетонируемой конструкции α , Вт/(м²·°C).

Термическое сопротивление R (м²·°C/Вт) каждой из сторон опалубки определяется по формуле

$$R = \frac{1}{\alpha} + \sum_1^n \frac{\delta_n}{\lambda_n}. \quad (3)$$

Ряд проведенных расчетов коэффициента теплообмена у наружной поверхности различных видов опалубок и данные наблюдений показали, что для условий Республики Беларусь эта величина для практических расчетов при выполнении бетонных работ на открытых площадках может быть принята 25–45 Вт/(м²·°C). В то же время моделью предусматривается возможность находить более точное ее значение расчетным путем.

Модель учитывает три основные стадии тепловой обработки: подъем температуры, изотермический прогрев и остывание.

Общий расход теплоты на подъем температуры бетонной смеси до изотермического прогрева $Q_{\text{п}}$, Дж:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{б}} - Q_{\text{х}} + Q_{\text{а}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{о}} + Q_{\text{пот}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{б}}$ – расход теплоты на нагрев бетонной смеси, Дж; $Q_{\text{х}}$ – теплота, выделенная в результате гидратации цемента при экзотермических реакциях, Дж; $Q_{\text{а}}$ – расход теплоты на нагрев арматуры, Дж; $Q_{\text{и}}$ – то же на испарение влаги в процессе подъема температуры, Дж; $Q_{\text{о}}$ – то же на нагрев опалубки, Дж; $Q_{\text{пот}}$ – потери теплоты в окружающую среду, Дж.

Расход теплоты для прогрева 1 м³ бетонной смеси $Q_{\text{б}}$, Дж:

$$Q_{\text{б}} = G_{\text{б}} c_{\text{б}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}), \quad (5)$$

где $G_{\text{б}}$ – масса бетонной смеси, кг; $c_{\text{б}}$ – удельная теплоемкость бетонной смеси, Дж/(кг·°C); $t_{\text{н}}$, $t_{\text{к}}$ – средние начальная и конечная температуры бетонной смеси, °C.

Количество теплоты, поступающей в результате экзотермической реакции цемента, на 1 м³ $Q_{\text{х}}$, Дж:

$$Q_{\text{х}} = G_{\text{ц}} q_{\text{хр}}, \quad (6)$$

где $G_{\text{ц}}$ – масса цемента в составе бетонной смеси, кг; $q_{\text{хр}}$ – удельное количество теплоты, выделяемого при химических реакциях (в расчетах принимается 92 Дж/(кг·°C)).

Количество теплоты для нагрева арматуры бетонируемой конструкции в расчете на 1 м³ $Q_{\text{а}}$, Дж:

$$Q_{\text{а}} = G_{\text{а}} c_{\text{а}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}), \quad (7)$$

где $G_{\text{а}}$ – масса арматуры на 1 м³ бетонной смеси, кг; $c_{\text{а}}$ – удельная теплоемкость материала арматуры, Дж/(кг·°C); $t_{\text{н}}$, $t_{\text{к}}$ – соответственно средние начальная и конечная температуры арматуры, °C.

Количество теплоты на испарение влаги из 1 м³ уложенной бетонной смеси в процессе подъема температуры $Q_{\text{и}}$, Дж:

$$Q_{\text{и}} = w_{\text{п}} q_{\text{и}} (100 - t_{\text{н}}), \quad (8)$$

где $w_{\text{п}}$ – масса влаги, испаряемой в процессе подъема температуры, кг; $q_{\text{и}}$ – удельный расход теплоты на испарение влаги из твердеющего бетона, Дж/кг.

Количество теплоты, необходимой для нагрева опалубочной системы $Q_{\text{о}}$, Дж:

$$Q_{\text{о}} = (G_{\text{о}} c_{\text{о}} + G_{\text{т}} c_{\text{т}}) (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}), \quad (9)$$

где $G_{\text{о}}$ – масса опалубки, кг; $c_{\text{о}}$ – удельная теплоемкость материала опалубки, Дж/(кг·°C); $G_{\text{т}}$ – масса теплоизоляции опалубки, кг; $c_{\text{т}}$ – удельная теплоемкость материала теплоизоляции, Дж/(кг·°C); $t_{\text{к}}$ – средняя температура опалубки к моменту окончания подъема температуры, °C; $t_{\text{н}}$ – средняя начальная температура опалубки, °C.

Расчет выполняется для отдельного конструктивного элемента в пересчете на 1 м³ бетонной смеси.

При определении потерь теплоты в окружающую среду в процессе подъема температуры расчетную схему можно рассматривать как систему с внутренним источником теплоты. От нагревательных проводов исходит тепловой поток, направленный к поверхности опалубки.

Средняя величина удельного теплового потока, проходящего через наружную поверхность опалубки q , Вт/м², при подъеме температуры, определяется по формуле

$$q = \frac{\Delta t}{2R_0}, \quad (10)$$

где Δt – перепад температур между зоной нагрева и наружным воздухом, °С; R_0 – общее термическое сопротивление каждой из сторон опалубки, м²·°С/Вт.

Потери теплоты для каждой из сторон $Q_{\text{пот}}$, Дж, можно рассчитать

$$Q_{\text{пот}} = \frac{F}{2R_0}(t_k - t_n)\tau, \quad (11)$$

где F – площадь каждой из рассчитываемых сторон, м²; τ – время подъема температуры, принимаемое в предварительном расчете значений 3–6 ч в зависимости от вида конструктивного элемента и его массивности.

Производится определение потерь теплоты в расчете подъема температуры одного конструктивного элемента и 1 м³ бетонной смеси данного конструктивного элемента. Далее находится общее количество теплоты на подъем температуры конструктивного элемента и 1 м³ бетонной смеси этого элемента.

Часовой расход теплоты на подъем температуры бетонной конструкции в целом и 1 м³ конструкции q_0 , Дж/ч, выполняется по формуле

$$q_0 = \frac{Q_{\text{п}}}{\tau}. \quad (12)$$

Время подъема температуры твердеющего бетона τ назначается исходя из трех основных соображений:

- предотвращения деструктивных явлений в результате большого перепада температуры в теле твердеющего бетона, зависящего от его массивности, характеризующейся модулем поверхности;
- возможности строительной организации в отборе необходимой мощности электрического тока;
- сроков выполнения комплекса бетонных работ.

Изотермический прогрев осуществляется в соответствии с принятыми параметрами при стационарном тепловом режиме.

Часть общей теплоты при прогреве бетонной смеси расходуется на испарение избытков

влаги в бетоне и потери в окружающую среду. Расход теплоты на испарение влаги при изотермическом прогреве происходит в основном в первые 10 ч прогрева.

Количество теплоты, необходимой для испарения влаги в процессе изотермического прогрева $Q_{\text{ит}}$, Дж, составит:

$$Q_{\text{ит}} = w_{\text{т}} q_{\text{и}} (100 - t_{\text{к}}), \quad (13)$$

а в расчете прогрева в течение 1 ч:

$$q_{\text{ит}} = \frac{Q_{\text{ит}}}{10}. \quad (14)$$

Количество теплоты определяется в расчете на 1 м³ уложенной бетонной смеси и на один конструктивный элемент.

Разрабатывается программное обеспечение реализации моделей тепловой обработки для следующих монолитных конструкций:

- ленточных фундаментов;
- столбчатых фундаментов;
- фундаментов под оборудование;
- колонн;
- стен;
- балок и ригелей;
- плит покрытий и перекрытий и др.

ВЫВОДЫ

Анализ показал, что наиболее адекватным методом определения необходимых параметров процесса тепловой обработки монолитных конструкций является моделирование, т. е. изучение этого процесса на моделях. Реализация математической модели такого процесса обеспечивает:

- определение требуемых параметров процесса тепловой обработки различного вида монолитных конструкций с разными модулями поверхности, выполненных из разных по составу бетонных смесей и имеющих различный процент армирования;
- оптимизацию режима тепловой обработки с учетом имеющегося в строительной организации трансформаторного оборудования и греющих устройств;
- сопоставление большого количества возможных решений [9, 10];
- возможность быстрого реагирования и выбора лучших вариантов при изменении условий протекания процесса, в том числе метеорологических условий, обеспечения энергоресурсами и т. д.;

- быстрое внесение корректив;
- использование автоматизации тепловой обработки;
- возможность при необходимости наглядного сопоставления отдельных решений в виде графиков и диаграмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Земляков, Г. В. Энергосберегающая организация строительного производства / Г. В. Земляков, С. П. Баранов, Г. Н. Игнатенко // Состояние и перспективы развития науки и подготовки инженеров высокой квалификации в Белорусской государственной политехнической академии: материалы 51-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 8 ч. – Минск: БГПА, 1995. – Ч. 5. – С. 99.
2. Земляков, Г. В. Исследование путей снижения затрат энергоресурсов в строительстве / Г. В. Земляков, С. П. Баранов, Е. И. Морозов // Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономичных и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения: материалы 54-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 10 ч. – Минск: БГПА, 2000. – Ч. 7. – С. 56.
3. Баранов, С. П. Анализ затрат энергоресурсов при производстве строительно-монтажных работ / С. П. Баранов, Г. В. Земляков, А. А. Лозовский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 2-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Минск: БНТУ, 2004 – Т. 1. – С. 465–469.
4. Земляков, Г. В. Исследование затрат энергоресурсов в строительстве / Г. В. Земляков, А. А. Лозовский // Технология строительства и реконструкции: проблемы и решения: сб. науч. трудов Междунар. конф.: в 2 т. – Минск: БНТУ, 2006. – Т. 1. – С. 105–107.
5. Земляков, Г. В. Мероприятия по снижению затрат энергоресурсов в строительстве / Г. В. Земляков, А. А. Лозовский // Архитектура и строительство. – 2005 – № 4. – С. 109–110.
6. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
7. Большой строительный терминологический словарь-справочник. Официальные и неофициальные термины и определения в строительстве, архитектуре, градостроительстве и строительной технике / В. Д. Наумов [и др.]; под ред. Ю. В. Феофилова. – Минск: Минсктиппроект, 2008. – 816 с.
8. Системотехника строительства: энциклопед. словарь / под ред. А. А. Гусакова. – М.: Фонд «Новое тысячелетие», 1999. – 432 с.
9. Лозовский, А. А. Формирование энергосберегающих технологических и организационных решений в строительстве / А. А. Лозовский, Г. В. Земляков // Строительная наука и техника. – 2007. – № 4 (13). – С. 98–103.
10. Земляков, Г. В. Энергосберегающие организационно-технические решения в строительном производстве / Г. В. Земляков, А. А. Лозовский // Строительная наука, техника и технологии: перспективы и пути развития: сб. науч. стат. конгресса. – М., 2010. – С. 236–241.

Поступила 30.06.2015

REFERENCES

1. Zemlyakov, G. V., Baranov, S. P., & Ignatenko, G. N. (1995) Energy-Saving Policy in Construction Industry. *Proceedings of 51st International Scientific and Technical Conference of BSPA (Belarusian State Polytechnic Academy) Professors, Lecturers, Researchers, Post-Graduate Students and Undergraduate Students “State and Prospects of Science Development and Training of High Qualification Engineers at the Belarusian State Polytechnic Academy” Dedicated to its 75th Anniversary. Part. 5.* Minsk, Belarusian State Polytechnic Academy, 99 (in Russian).
2. Zemlyakov, G. V., Baranov, S. P., & Morozov, E. I. (2000) Investigations on Reduction of Energy Resource Consumption in Construction. *Proceedings of International Scientific and Technical Conference “Contribution of HEI Science to Development of Priority Directions in Production and Economic Activity, Cost-Efficient and Ecologically Clean Technologies and Advanced Training Methods” Dedicated to the 80th Anniversary of at the Belarusian State Polytechnic Academy (54th Scientific and Technical Conference of BSPA Professors, Lecturers, Researchers and Post-Graduate Students) Part. 7.* Minsk, Belarusian State Polytechnic Academy, 56 (in Russian).
3. Baranov, S. P., Zemlyakov, G. V., & Lozovsky, A. A. (2004) Analysis of Energy Resource Consumption while Executing Construction and Installation Works. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy Vtoroi Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii. T. 1* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 2nd International Science and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk: BNTU, 465–469 (in Russian).
4. Zemlyakov, G. V., & Lozovsky, A. A. (2006) Investigations on Energy Resource Consumption in Construction. *Technology of Construction and Reconstruction: Problems and Solutions. Collection of Research Papers of International Conference Dedicated to the 70th Anniversary of “Construction Technology” Department and 85th Anniversary of Belarusian National Technical University. Vol. 1.* Minsk, BNTU, 105–107 (in Russian).
5. Zemlyakov, G. V., & Lozovsky, A. A. (2005) Measures on Reduction of Energy Resource Consumption in Construction. *Arkhitektura i Stroitelstvo* [Architecture and Construction], 4, 109–110 (in Russian).
6. Buslenko, N. P. (1978) *Simulation of Complicated Systems.* Moscow, Nauka. 399 p. (in Russian).
7. Naumov, V. D., Aliavdina, T. I., Bedula, N. V., Zholud, A. S., Zholud, T. V., Naumova, L. V., Poslova, T. G., Feofilova, Iu. Iu., & Frolova, T. S. (2008) *Unabridged Reference Dictionary on Construction Terminology. Official and Unofficial Terminology and Definitions in Construction, Architecture, Urban Planning and Construction Equipment.* Minsk, Minsktiproekt. 816 p. (in Russian).
8. Gusakov, A. A. (1999) *System Technique in Construction. Encyclopedic Dictionary.* Moscow, Fund “New Millennium”. 432 p. (in Russian).
9. Lozovsky, A. A., & Zemlyakov, G. V. (2007) Formation of Energy-Saving Technological and Organizational Solutions in Construction. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technique], 4 (13), 98–103 (in Russian).
10. Zemlyakov, G. V., & Lozovsky, A. A. (2010) Energy-saving Organizational and Technical Solutions in Construction Industry. *Collection of Research Papers. Congress “Construction Science, Technique and Technologies: Prospects and Development Options”.* Moscow, 236–241 (in Russian).

Received 30.06.2015

ДОБАВКИ В ХОЛОДНЫЕ АСФАЛЬТОБЕТОНЫ ИЗ ЭМУЛЬСИОННО-МИНЕРАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Инж. **ВАВИЛОВ П. В.**¹⁾, канд. техн. наук, доц. **КРАВЧЕНКО С. Е.**²⁾

¹⁾ОТН ГПО «Горремавтодор Мингорисполкома» (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

E-mail: p.vavilov@gmail.com

Рассмотрены вопросы применения добавок в холодные асфальтобетоны из эмульсионно-минеральных смесей. Актуальность данной проблемы заключается в необходимости обоснования и регламентирования использования добавок для регулирования свойств холодных асфальтобетонов. Обобщены результаты анализа нормативных, литературных и других источников, касающихся применения добавок в холодные асфальтобетоны из эмульсионно-минеральных смесей.

Предлагается и обосновывается классификация добавок в холодные асфальтобетоны по их функциональному назначению (основное назначение действия добавки) на: повышающие прочность, водостойкость, долговечность; регулирующие формирование и технологические модификаторы. В зависимости от назначения предложены критерии технической эффективности использования добавок. Для каждого из критериев предлагаются методики определения одного или нескольких качественных показателей, изменение которых указывает на эффективность добавки. Приводятся формулы для нахождения эффективности добавок, предназначенных для сокращения периода формирования холодных асфальтобетонов из эмульсионно-минеральных смесей. В качестве примера представлены расчет и анализ эффективности добавок для регулирования (ускорения) формирования структуры холодных асфальтобетонов по ранее опубликованным экспериментальным данным. Эффективность добавок, регулирующих формирование, определена на основании функций изменения во времени предела прочности на сжатие и динамического модуля упругости холодных асфальтобетонов из эмульсионно-минеральных смесей.

Приводится примерный перечень материалов, которые могут или в настоящее время применяются в качестве регулирующих добавок в холодные асфальтобетоны. Предложенная классификация и критерии могут служить основанием для целенаправленного регулирования составов и свойств холодных асфальтобетонов из эмульсионно-минеральных смесей.

Ключевые слова: добавки, классификация, критерии эффективности, эмульсионно-минеральные смеси.

Табл. 3. Библиогр.: 19 назв.

ADDITIVES FOR COLD ASPHALT-CONCRETE MADE FROM EMULSION-MINERAL MIXES

VAVILOV P. V.¹⁾, **KRAVCHENKO S. E.**²⁾

¹⁾SIA "Gorremavtodor Mingorispolkoma" (City Automobile Road Repair Organization of Minsk City Executive Committee) (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

The paper considers application of additives for cold asphalt-concrete made from emulsion-mineral mixes. Significance of the problem is in necessity to substantiate and control usage of the additives in order to regulate properties of the cold asphalt-concrete. Analysis results of reference, literature and other sources pertaining to application of additives for the cold asphalt-concrete made from emulsion-mineral mixes have been generalized in the paper.

The paper proposes and justifies a classification of additives for cold asphalt-concrete according to its functional purpose (main purpose of additive application): strength improvement, water resistance, durability, regulation of formation and technological modifiers. Depending on the application purpose criteria on technical efficiency of additive usage have been offered in the paper. Methodology for determination of one or several quality indicators has been proposed for every criterion. Criterion changes show the additive efficiency. The paper describes formulae for determination of the additive efficiency which are intended for reduction of the period which is required for formation of cold asphalt-concrete made from emulsion-mineral mixes. Calculation and analysis of the additive efficiency for regulation (acceleration) of structure formation in asphalt-concrete have been presented as an example according to previously published experimental data. Efficiency of the additives regulating formation process has been determined on the basis of functions for temporal changes in ultimate compressive strength and dynamic elasticity modulus of the cold asphalt-concrete made from emulsion-mineral mixes.

The paper contains generic list of materials that can be used or which are currently used as additives for cold asphalt-concrete. The proposed classification and criteria can serve as a basis for purposeful regulation of compositions and properties of the cold asphalt-concrete made from emulsion-mineral mixes.

Keywords: additives, classification, efficiency criteria, emulsion-mineral mixes.

Tab. 3. Ref.: 19 titles.

Введение. Эмульсионно-минеральные смеси (ЭМС) для устройства несущих слоев дорожных одежд в Беларуси применяются уже более 40 лет. Отечественный опыт последних 10 лет использования данной технологии свидетельствует о том, что значительное улучшение характеристик холодных асфальтобетонов из ЭМС возможно с применением специальных добавок. Однако в данном вопросе существуют определенные терминологические разногласия, не регламентирован порядок применения добавок, отсутствуют критерии их технической эффективности.

Классификация добавок в холодные асфальтобетоны. Нормативные документы [1–4] различным образом называют и определяют добавки в смеси с использованием катионных битумных эмульсий: уплотняющая добавка (ускоритель формирования), структурирующая добавка [1]; активная добавка [2]; добавка [3], регулятор скорости формирования; минеральная добавка, волокнистая добавка [4]. Учитывая, что добавки в холодные асфальтобетоны вводят для целенаправленного изменения (регулирования) какого-либо свойства одного или нескольких исходных компонентов, процессов их взаимодействия, а также и всей смеси, предлагаем использовать объединяющий термин «добавки (регулирующие)».

За основу классификации регулирующих добавок возьмем их функциональное назначе-

ние (основное назначение действия добавки) аналогично [5]. Таким образом, учитывая особенности физико-химических процессов, протекающих в ЭМС, свойства ЭМС [6–8], технологии приготовления и применения холодных асфальтобетонов [9], регулирующие добавки разделим на пять классов:

- повышающие прочность;
- повышающие водостойкость;
- регулирующие формирование;
- технологические модификаторы;
- повышающие долговечность.

Критерии технической эффективности добавок и методы их определения. В основу оценки эффективности регулирующих добавок заложим сравнение показателей холодного асфальтобетона контрольного (не содержащего добавки) и основного составов (с добавкой) аналогично определению эффективности добавок в бетоны [10]. Испытания проводили в нормативном возрасте (14 сут.) и в ранние сроки (для добавок, регулирующих формирование) с целью подтверждения двух положений:

- добавка обеспечивает заявленный основной эффект;
- в возрасте 14 сут. холодный асфальтобетон соответствует нормативным требованиям.

На основании анализа нормативных [4, 5, 10] и других [7, 9, 11, 12] источников использовали критерии технической эффективности регулирующих добавок, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Критерии эффективности регулирующих добавок

Добавка	Основной эффект от воздействия	Критерий технической эффективности				
		Качественный показатель			Критерий	
		Свойство/Показатель	Обозначение	Методика	Обозначение	Нормируемое значение
1. Повышающая прочность	Повышение прочности холодного асфальтобетона из ЭМС	Предел прочности на сжатие при температуре 20 °С в возрасте 14 сут., МПа	$R_{сж}^{осн}, R_{сж}^k$	[1]	$\Delta R_{сж}$	$\Delta R_{сж} \geq 20\%$
2. Повышающая водостойкость	Повышение водостойкости холодного асфальтобетона из ЭМС	Коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении	$K^{осн}, K^k$	[1]	ΔK	$\Delta K \geq 20\%$
3. Регулирующая формирование	Ускорение формирования холодного асфальтобетона из ЭМС	Скорость изменения предела прочности на сжатие, МПа/сут.	$R_{сж}^{осн}, R_{сж}^k$	[1]	$\Delta a_{сж}$ и/или $\Delta b_{сж}$	$\Delta a_{сж} \geq 15\%$ и/или $\Delta b_{сж} \geq 15\%$
4. Технологические модификаторы	Улучшение процесса перемешивания ЭМС/изменение срока хранения ЭМС	Усилие сдвига в определенных промежутки времени, МПа	$R_{сд}^{осн}, R_{сд}^k$	[13]	$\Delta R_{сд}$	$(R_{сд}^{осн} - R_{сд}^k) \rightarrow$ оптимальное значение
5. Повышающая долговечность	Повышение долговечности холодного асфальтобетона из ЭМС	Прогнозируемая усталостная повреждаемость в возрасте 14 (28) сут., %	$D_{п}^{осн}, D_{п}^k$	[14]	$\Delta D_{п}$	$(D_{п}^{осн} - D_{п}^k) \geq 0,5\%$

Аналогично [10] критерии эффективности ΔКП, %, добавок № 1–3 (табл. 1) определим следующим образом:

$$\Delta КП = \frac{КП^{очн} - КП^k}{КП^k} \cdot 100, \quad (1)$$

где КП^{очн}, КП^k – качественный показатель (изменение которого указывает на эффективность добавки) холодного асфальтобетона основного и контрольного составов.

Качественные показатели эффективности добавок (за исключением технологических модификаторов) находят с помощью общеизвестных методик, потому определение технической эффективности не должно вызывать затруднений. Технологический модификатор перемешивания должен обеспечить снижение до приемлемого уровня сдвигового усилия, возникающего при перемешивании компонентов ЭМС в смесителе. Модификаторы хранения должны увеличивать период времени, в течение которого когезия смеси в штабеле остается на уровне, позволяющем выполнять производственные операции по хранению и укладке. Фактические значения этих показателей еще предстоит установить. Для определения оптимального количества технологических модификаторов наиболее подходящим представляется испытание на технологичность по методике Nupas [13], позволяющее напрямую измерить усилие сдвига, возникающее при перемещении компонентов (слоев) смеси относительно друг друга в различные моменты времени. В качестве альтернативных (косвенных) способов можно использовать стандартные методики: испытание на слеживаемость [14, 15], метод динамического зондирования [16], способ ударного уплотнения на приборе «СоюздорНИИ» [17].

Для добавок, регулирующих формирование, предварительно необходимо установить временную функцию изменения предела прочно-

сти на сжатие холодного асфальтобетона основного и контрольного составов вида:

$$R_{сж}^{очн}(T) = a_{сж}^{очн} \ln T + b_{сж}^{очн}; \quad (2)$$

$$R_{сж}^k(T) = a_{сж}^k \ln T + b_{сж}^k, \quad (3)$$

где $a_{сж}^{очн}$, $a_{сж}^k$ – коэффициент, характеризующий скорость изменения предела прочности на сжатие образцов основного и контрольного составов, МПа/сут.; $b_{сж}^{очн}$, $b_{сж}^k$ – свободный член функции предела прочности на сжатие, характеризующий начальную прочность на сжатие образцов основного и контрольного составов, МПа; T – возраст образцов холодного асфальтобетона, сут.

При установлении функций (2) и (3) прочность на сжатие определяли в раннем (1–7 сут.) и нормативном (14 сут.) возрасте. Затем находили критерий эффективности по формуле (1). Для снижения трудоемкости процесса установления оптимального расхода добавки (необходимо изготовить 12 образцов для одного расхода добавки) использовали динамический импульсный метод контроля [18]. Для этого брали всего три образца, а в случае параллельных испытаний на долговечность – образцы, предназначенные для определения усталостной повреждаемости.

Для примера в табл. 2 и 3 приведен расчет эффективности добавок в холодные асфальтобетоны по ранее опубликованным данным [19].

Высокий уровень статистической значимости временных функций является причиной больших значений критериев эффективности добавок, а также разницы между величинами критериев эффективности, вычисленных по скорости изменения предела прочности и модуля упругости. Таким образом, для получения достоверных данных о влиянии расхода добавки на скорость формирования холодного асфальтобетона необходимо получить надежные временные функции прочности и модуля упругости.

Таблица 2

Расчет эффективности добавок для ЭМС на основе отсева дробления [19]

Состав	$R_{сж}(T) = a_{сж} \ln T + b_{сж}$			Критерий эффективности, %		$R_E(T) = a_E \ln T + b_E$			Критерий эффективности, %	
	$a_{сж}$	$b_{сж}$	p -уровень	$\Delta a_{сж}$	$\Delta b_{сж}$	a_E	b_E	p -уровень	Δa_E	Δb_E
X(o) 40 МПа	0,1169	1,5416	0,0747	–	–	597,6994	1492,8168	0,3242	–	–
X(o/y) 40 МПа	0,5548	1,1110	0,1876	375	–28	640,0164	1548,9005	0,0234	7	4
X(o/и) 40 МПа	0,3956	0,9109	0,3335	238	–41	451,9180	1609,9849	0,1688	–24	8

Расчет эффективности добавок для ЭМС на основе природного песка [19]

Состав	$R_E(T) = a_E \ln T + b_E$			Критерий эффективности, %		Состав	$R_E(T) = a_E \ln T + b_E$			Критерий эффективности, %	
	a_E	b_E	p -уровень	Δa_E	Δb_E		a_E	b_E	p -уровень	Δa_E	Δb_E
X(п) 20 МПа	831,6738	556,5613	0,2534	–	–	X(п) 40 МПа	95,5628	2327,5962	0,8933	–	–
X(п/д) 20 МПа	1012,1230	26,5399	0,0233	22	–95	X(п/д) 40 МПа	1348,4150	–420,1040	0,0245	1311	–118
X(п/и) 20 МПа	970,7969	–83,4273	0,1440	17	–115	X(п/и) 40 МПа	1477,8130	–764,7914	0,0055	1446	–133

Предложенная классификация добавок требует проведения дополнительных исследований в части испытательных методик, нормируемых значений критериев эффективности. Кроме того, классификация также требует уточнения, поскольку добавки в ЭМС часто обладают несколькими положительными эффектами, которые целесообразно указывать одновременно.

Материалы, применяемые в качестве регулирующих добавок для холодных асфальтобетонов, можно классифицировать следующим образом:

- повышающие прочность – тонкодисперсные минеральные материалы (цементы, известия, золы уноса, минеральные порошки, фосфорные шлаки, порошковые отходы [2], дефека и т. д.);
- повышающие водостойкость – поверхностно-активные вещества (ПАВ);
- регуляторы формирования – уплотняющие добавки [1], карбонатные и т. п. шламы, ПАВ, тонкодисперсные минеральные материалы;
- технологические модификаторы – вода предварительного увлажнения, ПАВ, пластификаторы битума, растворители;
- повышающие долговечность – катионные латексы, полимерные добавки, волокнистые материалы [4].

ВЫВОД

Разработка классификации добавок в холодные асфальтобетоны и установление критериев их технической эффективности позволят наиболее рационально подходить к выбору дополнительных компонентов в эмульсионно-минеральные смеси, обоснованно назначать их расход и целенаправленно изменять свойства

холодных асфальтобетонов, что послужит новым импульсом для совершенствования дорожно-строительных материалов данного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автомобильные дороги. Правила устройства покрытий и оснований из эмульсионно-минеральных смесей: ТКП 306–2011 (02191) – Введ. 01.06.2001. – Минск: Департамент «Белавтодор», 2011. – 27 с.
2. Смеси органоминеральные и грунты, укрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства: ГОСТ 30491–97. – Введ. 01.03.1998. – Минск: Минстройархитектуры, 1998. – 21 с.
3. Пособие по приготовлению и применению битумных дорожных эмульсий: к СНиП 3.06.03–85. – Введ. 25.03.1987. – М.: Стройиздат, 1989. – 56 с.
4. Смеси асфальтобетонные литые холодные для устройства защитных слоев. Технические условия: СТБ 2036–2010. – Введ. 01.08.2010. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2010. – 20 с.
5. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112–98. – Взамен ГОСТ 24211–91; введ. 01.01.1999. – Минск: Минстройархитектуры, 1999. – 23 с.
6. Костова, Н. З. К вопросу о механизме взаимодействия катионных битумных эмульсий с минеральными материалами / Н. З. Костова, И. А. Плотникова, Э. М. Рвачева // Труды СоюздорНИИ, – М.: СоюздорНИИ, 1977. – Вып. 100. – С. 93–107.
7. Bitumen Emulsion / Under the Coordination M. Сyна, M.-F. Ossola. – Paris: RGRA, USIRF, 2008. – С. 225–226.
8. Cold Mix Technology: The Contribution from the Optel Project / В. Eckmann [et al.] // Revue Générale des Routes et des Aerodromes. – 2001. – № 792. – P. 6–15.
9. Вавилов, П. В. Смеси эмульсионно-минеральные. Методы подбора состава и испытаний. Технические требования и свойства. Обзорная информация / П. В. Вавилов, С. Е. Кравченко, Н. В. Радьков. – Минск: БелдорНИИ, 2012. – С. 4–10.
10. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности: ГОСТ 30459–96. – Введ. 01.07.98. – Минск: Минстройархитектуры, 1997. – 40 с.
11. Исследование, совершенствование составов, технологии получения и применения эмульсионно-минеральных смесей с ускоренным сроком формирования: отчет о НИР (закл.) / Государственное предприятие «БелдорНИИ». – Минск, 2009. – № ГР 20071425. – Арх. № 1113.

12. Исследование свойств и разработка технологии получения и применения структурированных волокнистыми добавками эмульсионно-минеральных смесей: отчет о НИР (закл.) / Государственное предприятие «БелдорНИИ». – 2010. – № ГР 20090803. – Арх. № 1163.

13. Characterisation of Cold Mixes with Regard to Workability and Cohesion Build-up / В. Eckmann [et al.] // *Revue Générale des Routes et des Aerodromes*. – 2002. – January. – № 802.

14. Рекомендации по повышению усталостной долговечности асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: ДМД 02191.2.042–2010. – Введ. 01.02.2011. – Минск: Департамент «Белавтодор», 2010. – 23 с.

15. Смесей асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний: СТБ 1115–2004. – Введ. 01.01.2005. – Минск: Минстройархитектуры, 2005. – 36 с.

16. Плотномер динамический. Технические условия: СТБ 1242–2000. – Введ. 01.07.2001. – Минск: Минстройархитектуры, 2001. – 8 с.

17. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности: ГОСТ 22733–2002. – Взамен ГОСТ 22733–77; введ. 01.01.06. – Минск: Минстройархитектуры, 2006. – 12 с.

18. Рекомендации по определению динамического модуля упругости асфальтобетона методом неразрушающего динамического импульса: ДМД 02191.2.044–2011. – Введ. 01.03.2011. – Минск: Департамент «Белавтодор», 2011. – 10 с.

19. Вавилов, П. В. Дорожные бетоны из эмульсионно-минеральных смесей с модифицирующими добавками. Оценка и прогнозирование срока их формирования / П. В. Вавилов, С. Е. Кравченко // *Автомобильные дороги и мосты*. – 2011. – № 2 (8). – С. 58–68.

Поступила 08.07.2014

REFERENCES

1. ТКР [Technical Code of Good Practice] 306–2011 (02191) Automobile Roads. Regulations on Road Pavement and Pavement Base while Using Emulsion-Mineral Mixtures. Minsk: “Belavtodor” Department, 2011. 27 p. (in Russian).

2. State Standard 30491–97. Organo-Mineral Mixtures and Soils Reinforced with the Help of Organic Binders for Road and Airdrome Construction. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 1998. 21 p. (in Russian).

3. SNiP [Construction Rules and Regulations] 3.06.03–85. Text Book for Preparation and Application of Bitumen Road Emulsions. Moscow, Stroyizdat, 1989. 56 p. (in Russian).

4. STB [Standards of the Republic of Belarus] 2036–2010. Asphalt-Concrete Cast Cold Mixes for Protective Layers. Technical Specifications. Minsk, State Committee for Standardization of the Republic of Belarus, 2010. 20 p. (in Russian).

5. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1112–98. Additives for Concrete. General Technical Specifications. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 1999. 23 p. (in Russian).

6. Kostova, N. Z., Plotnikova, I. A., & Rvachiova, E. M. (1977) To the Problem on Interaction Mechanism of Cation

Bitumen Emulsions with Mineral Materials. *Proceedings of SoyuzdorNII* [Road Scientific-Research Institute]. Moscow, Publishing House of SoyuzdorNII, 100, 93–107 (in Russian).

7. Cyna, M., & Ossola, M.-F. (2008) *Bitumen Emulsion*. Paris, RGRA, USIRF, 225–226.

8. Eckmann, E., Potti, J. J., Bourrel, M., Verlhac, P., Such, C., Leal Calderon, F., & Sanchez Polo, J. (2001) Cold Mix Technology: The Contribution from the Optel Project. *Revue Générale des Routes et des Aerodromes*, 792, 6–15.

9. Vavilov, P. V., Kravchenko, S. E., & Radkov, N. V. (2012) *Emulsion-Mineral Mixes. Methods for Selection of Composition and Tests. Technical Specifications and Properties. Survey Information*. Minsk, BeldorNII, 4–10 (in Russian).

10. State Standard 30459–96. Additives for Concrete. Methods for Efficiency Determination. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 1997. 40 p. (in Russian).

11. State-Run Enterprise “BeldorNII”. (2009) Investigations, Improvement of Compositions, Technology and Application for Emulsion-Mineral Mixes with Accelerated Formation Period. Report on Research Work (final). No ГР 20071425. Archive No 1113 (in Russian, Unpublished).

12. State-Run Enterprise “BeldorNII”. (2010) Investigations of Properties and Technology Development for Obtaining and Application of Structured Emulsion-Mineral Mixes with the Help of Fibre Additives. Report on Research Work (final). No ГР 20090803. Archive No 1163 (in Russian, Unpublished).

13. Eckmann, B., Le Bec, S., Lesueur, D., Le Roux, C., & Brion, Yv. (2002) Characterization of Cold Mixes with Regard to Workability and Cohesion Build-up. *Revue Générale des Routes et des Aerodromes*, 802.

14. DMD 02191.2.042–2010. Recommendations on Improvement of Fatigue Life for Asphalt-Concrete Pavements of Automobile Roads. Minsk, “Belavtodor” Department, 2010. 23 p. (in Russian).

15. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1115–2004. Asphalt-Concrete Road, Airdrome Mixes and Asphalt-Concrete. Test Methods. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2005. 36 p. (in Russian).

16. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1242–2000. Dynamic Density Analyzer. Technical Specifications. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2001. 8 p. (in Russian).

17. State Standard 22733–2002. Soils. Method for Laboratory Determination of Maximum Density. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2006. 12 p. (in Russian).

18. DMD 02191.2.044–2011. Recommendations on Determination of Dynamic Elasticity Module for Asphalt-Concrete while Using Method of Non-Destructive Dynamic Impulse. Minsk, “Belavtodor” Department, 2011. 10 p. (in Russian).

19. Vavilov, P. V., & Kravchenko, S. E. (2011) Road Concrete Prepared with the Help of Emulsion-Mineral Mixes with Modified Additives. Assessment and Prediction of their Formation Period. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty* [Automobile Roads and Bridges], 2 (8), 58–68 (in Russian).

Received 08.07.2014

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ УРОВНЕЙ ИХ ВИБРОНАГРУЖЕННОСТИ

Канд. техн. наук, доц. ОСИНОВСКАЯ В. А.¹⁾

¹⁾*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет – МАДИ
(Москва, Российская Федерация)*

E-mail: onika44@mail.ru

Проблема низкой долговечности дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями является одной из важнейших в дорожной отрасли: фактические сроки службы асфальтобетонных покрытий в России не превышают 3–5 лет. Плохое состояние автомобильных дорог – тормоз для развития народного хозяйства, что приводит к значительным ежегодным экономическим потерям. В настоящее время эта задача не имеет однозначного решения. Даже при кажущемся хорошем состоянии дорог Европы и Америки проблема низкой долговечности стоит не менее остро и в этих странах. Данные вопросы с каждым годом становятся все более актуальными.

Проведенные автором научные исследования позволили выдвинуть гипотезу, что проектируемые дорожные конструкции не обладают необходимой прочностью еще на стадии проектирования, потому что в расчетах на прочность совершенно не учитывается вибрация дорожных конструкций. Особенно актуальным учет вибрационного нагружения становится в наши дни, поскольку значительно изменился характер нагружения дорожных конструкций. В результате прогибы дорожных конструкций уменьшаются, но возросшая вибрация ускоряет процессы разрушения и существенно снижает их долговечность.

Разработанная теория вибрационного разрушения позволяет регулировать вибрационный механизм, формировать виброзащищенные дорожные конструкции, а также прогнозировать их остаточный ресурс, что дает возможность более эффективно разрабатывать ремонтные мероприятия.

Ключевые слова: автомобильная дорога, жесткая дорожная одежда, проектирование, колебания, виброзащита, долговечность.

Ил. 2. Библиогр.: 15 назв.

FORECASTING OF DURABILITY OF ASPHALT-CONCRETE PAVEMENT ON THE BASIS OF THEIR VIBRATION LOADING RATE

OSINOVSKAYA V. A.¹⁾

¹⁾*Moscow Automobile and Road Construction University – MADI (Moscow, Russian Federation)*

The problem of low durability of road pavement with asphalt-concrete surfacing is considered as one of the most important issues in highway sector. So the actual service life of the asphalt-concrete pavement in Russia does not exceed 3–5 years. Poor condition of automobile roads is an obstacle for the development of national economy that leads to significant annual economic losses. At the present time this problem does not have a single solution. Even having semblant good conditions of roads in Europe and America the problem of low durability is still a challenge in these countries as well. And these problems becomes more and more actual with every passing year.

The executed researches investigations have made it possible to develop a hypothesis that designed road constructions do not have the required durability even at the designing stage because while making strength calculations vibration of road constructions is not taken into account. The vibration loading becomes rather important at the present day because character of road construction loading has been changed rather substantially. Due to this deflections of the road constructions are diminishing but their increased vibration accelerates destruction processes and significantly reduces durability of the constructions.

The developed theory of vibration destruction allows to control a vibration mechanism, to form vibration proof road constructions and predict their residual life of pavements that provides the possibility to organize efficient repair measures.

Keywords: automobile road, flexible pavement, designing, vibrations, vibration protection, durability.

Fig. 2. Ref.: 15 titles.

Введение. Наиболее уязвимым элементом дорожной конструкции является асфальтобетонное покрытие. Это связано с тем, что непосредственно на него оказывают воздействие движущийся автомобильный транспорт и окру-

жающая среда. Разрушение покрытий, имеющих выбоины, трещины и нарушения ровности, учитывается при проектировании и расчетах дорожных конструкций на прочность. При этом предусматривается, что предельно допустимый

уровень этих разрушений ожидается только в конце планового срока эксплуатации, что вызывает необходимость проведения капитального ремонта дорог.

Если конструирование нежестких дорожных одежд в странах СНГ производится на основе теоретического расчета, то за рубежом основное внимание уделяется экспериментальным исследованиям. Например, широко известен эксперимент AASHO [1], в результате которого были созданы альбомы типовых дорожных конструкций.

В странах СНГ методологическая база расчета и конструирования нежестких дорожных одежд базируется на многолетних научных трудах выдающихся ученых-дорожников, включая таких, как Н. Н. Иванов, А. К. Бируля, В. Ф. Бабков, А. М. Кривисский, М. Б. Корсунский и др. [2–4]. В их работах за показатель прочности дорожной конструкции принята некоторая комплексная характеристика – допускаемый упругий прогиб. Расчет на прочность нежесткой дорожной одежды предусмотрен для наиболее опасного весеннего периода года, когда происходит переувлажнение земляного полотна. В расчет закладываются значительные запасы прочности, учитываются закономерности работы дорожных конструкций под действием статических и динамических нагрузок. Однако при эксплуатации мы имеем преждевременное разрушение.

Все это время дорожная наука не стояла на месте. Разрабатывались новые материалы (например, ЩМА), вводились новые элементы (геосетки), совершенствовались технологии строительства и контроля качества. Однако значительных результатов в области повышения долговечности дорожных одежд в настоящее время нет.

Проблема преждевременного разрушения асфальтобетонных покрытий стоит достаточно остро во всем мире. Признание данного факта – это появление в последнее время научных концепций «вечных» дорожных одежд [5]. Суть таких концепций – дорожная конструкция должна иметь прочное основание, работоспособное в течение 50 лет эксплуатации, и «сменное» асфальтобетонное покрытие.

Для того чтобы избежать преждевременного разрушения асфальтобетонных покрытий, необходимо прежде всего выявить причины этого явления. Проведенные автором научные исследования позволили установить следующее [6–8]:

- дорожные конструкции, в том числе асфальтобетонные покрытия, не обладают в эксплуатации необходимой прочностью;
- недостаточная прочность покрытий закладывается при самом проектировании, так как при расчетах на прочность даже косвенно не учитывается дополнительное динамическое воздействие на дорожные слои в виде вибрационного нагружения;
- вибрационное нагружение по разрушительной способности не только сопоставимо с нагружениями от колес движущегося автомобильного транспорта, но, обладая спецификой знакопеременных деформаций, может превосходить все виды других нагружений;
- долговечность асфальтобетонных покрытий напрямую связана с уровнем вибрационных нагружений (большой уровень – малая долговечность);
- уровнем вибрационного нагружения можно управлять и формировать его и, следовательно, повышать долговечность асфальтобетонных покрытий.

Особенно актуальным учет вибрационного нагружения становится в наши дни, поскольку значительно изменились характер нагружения дорожных конструкций и сами конструкции. В транспортных потоках появилось большое количество большегрузных многоосных автомобилей, возросли нагрузки на ось, что привело к увеличению статической и динамической нагрузок на дорогу, а возросшие скорости движения сократили время контакта колеса с покрытием в отдельных точках поверхности. Увеличились толщины конструкций дорожных одежд и соответственно суммарная прочность. За рубежом толщина конструкций с асфальтобетонными покрытиями достигает 1,5 м. В результате прогибы дорожной конструкции уменьшаются, но возросшая вибрация ускорила процессы разрушения и существенно снизила их долговечность.

Вибрация слоев дорожной одежды. При воздействии колес движущихся автомобилей на дорожную конструкцию в ней возбуждаются свободные затухающие колебания, которые развиваются в каждом слое дорожной одежды и грунте земляного полотна. В связи с тем, что все эти элементы имеют между собой упругие и инерционные связи, их колебания совершаются как совместные и взаимосвязанные. Колебания дорожных конструкций можно зафиксировать с помощью вибродатчиков, установленных на поверхности покрытия, как это показано на рис. 1.

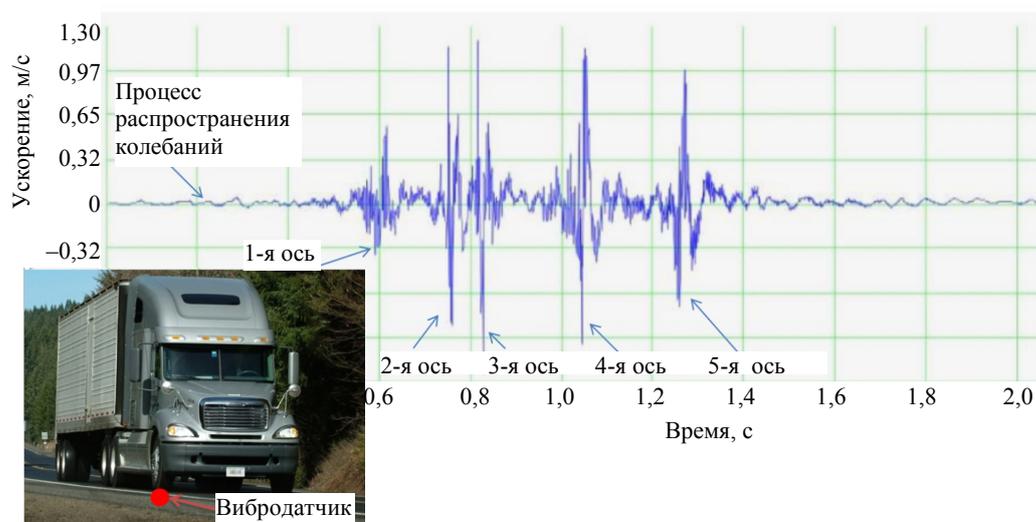


Рис. 1. Экспериментальная запись вибрации дорожной конструкции [9]

Представленная на рис. 1 экспериментальная запись вибрации используется в качестве амплитудно-временной характеристики отклика дорожной конструкции на внешнее воздействие колес. Экспериментальные записи колебательных процессов реальных дорожных конструкций позволяют выявить некоторую совокупность частот колебаний всей системы и оценить уровни этих колебаний по величинам виброускорений, виброскоростей и виброперемещений. К сожалению, все эти показатели мало информативны для оценки прочности или долговечности дорожных конструкций. Во-первых, определение общих частот свободных колебаний имеет значение главным образом при выявлении зон вынужденных колебаний (дorzонансных, резонансных и зарезонансных). Вынужденные колебания в конкретных точках поперечного сечения дорожной конструкции (места установки вибродатчиков) отсутствуют, так как источником возбуждения колебаний являются движущиеся автомобили.

Во-вторых, по величинам виброускорений на поверхности покрытия невозможно оценить возникающие при колебаниях деформации и напряжения в дорожных слоях и, следовательно, выявить связь с разрушительными процессами дорожных конструкций.

Вибрационное нагружение дорожной конструкции. Оценку разрушительной способности вибронагружения можно проводить на основе теоретической модели колебаний дорожной конструкции, разработанной автором [10]. Модель позволяет установить вибрационные деформации дорожных слоев и выявить их

прочностные качества, в том числе и по отношению к вибрационному нагружению. Кроме того, с ее помощью можно рассчитать вибрационные прогибы как каждого слоя, так и всей дорожной конструкции. Эти прогибы, если они учтены при проектировании дорожных одежд, позволяют не только заложить необходимые прочностные показатели на стадии проектирования, но и спрогнозировать долговечность отдельных дорожных слоев, включая слои асфальтобетонного покрытия.

Возникающее при колебаниях вибрационное нагружение дорожной конструкции – это процесс силового взаимодействия слоев дорожной одежды и грунта земляного полотна, формирующий в конструкции деформации (прогибы) и напряжения.

В результате комплекса теоретических исследований автором созданы модели колебаний различных дорожных конструкций и определены их динамические показатели [11].

Эти модели позволяют имитировать колебания дорожных слоев при формировании общего колебательного процесса конструкций. Они обладают обязательным критерием подобия для колебательных систем, а именно совпадением совокупности частот свободных колебаний дорожной конструкции и модели. На основе моделей можно определить, например, изгибные деформации или прогибы слоев асфальтобетонного покрытия, реализуемые при колебательных процессах. Особенности моделей состоят также в том, что в число их динамических показателей входят расчетные характеристики, используемые в нормах на

проектирование, а именно, расчетные модули упругости и плотности.

При расчете асфальтобетонных покрытий на сопротивление усталостному разрушению при изгибе с учетом вибрационного нагружения вибрационные прогибы с использованием специально разработанной технологии переводятся в дополнительное воздействие от условных движущихся расчетных автомобилей. Это позволяет выразить вибрационное нагружение через некоторое количество дополнительных приложений расчетной нагрузки за плановый срок службы. Эффект от этого равносителен реализации сверхплановой интенсивности движения [12].

Прогнозирование долговечности асфальтобетонных покрытий. Для прогнозирования долговечности асфальтобетонных покрытий на основе их усталостной прочности разработан и предложен графоаналитический метод. Алгоритм реализации метода заключается в следующем:

- рассчитывается теоретическая кривая усталости асфальтобетонного покрытия по уравнению [13]

$$\sum N_{p15} = \left(\alpha K_2 (1 - v_R t) \frac{R_0}{R_N} \right)^m, \quad (1)$$

где R_0 – нормативное значение предельного сопротивления растяжению при изгибе; R_N – предельное растягивающее напряжение; K_2 – коэффициент, учитывающий влияние погодноклиматических факторов ($K_2 = 0,8$); v_R – коэффициент вариации прочности на растяжение ($v_R = 0,1$); t – коэффициент нормативного отклонения ($t = 1,71$); α – коэффициент уточнения; m – показатель, зависящий от свойств материала;

- рассчитываются кривые нагружения конкретных спроектированных дорожных конструкций

$$\sum N_p = 0,7 N_p \frac{K_c}{q^{T-1}} T_{p.d.g} K_n, \quad (2)$$

где N_p – интенсивность движения на конец срока службы, авт./сут.; $\sum N_p$ – сумма нагружений за весь период работы, авт.; K_c – коэффициент суммирования,

$$K_c = \frac{q^T - 1}{q - 1}; \quad (3)$$

q – показатель приращения интенсивности по годам; $T_{p.d.g}$ – число расчетных климатических

дней в году, дн.; K_n – коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого;

- строится номограмма определения сроков усталостного разрушения дорожного покрытия. Вид номограммы показан на рис. 2.

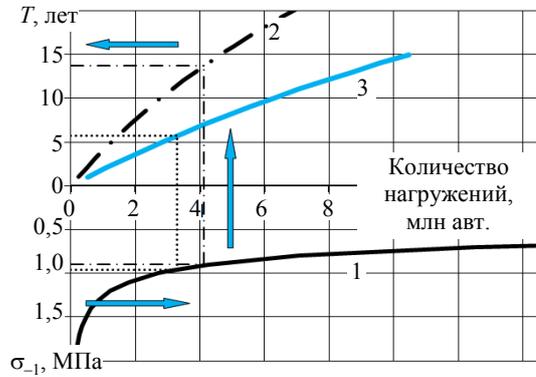


Рис. 2. Диаграмма определения прогнозируемых сроков усталостного разрушения дорожного покрытия с учетом вибрации: 1 – кривая усталости; 2 – то же виброн нагружения виброзащищенного конструктивного варианта; 3 – то же традиционной конструкции

Как видно из номограммы, по ней можно спрогнозировать долговечность асфальтобетонного покрытия, а также дать сравнительную оценку прочностных качеств покрытий для различных дорожных конструкций. На рис. 2 представлена кривая нагружения для конструкции с пониженным уровнем виброн нагружения. Для создания конструкции с пониженным уровнем виброн нагружения разработан специальный, предназначенный для дорожных конструкций метод виброзащиты [14]. Данная конструкция защищена патентом на изобретение [15]. Из номограммы также следует, что долговечность асфальтобетонных покрытий можно значительно повысить, осуществляя мероприятия по виброзащите дорожных слоев.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного цикла исследований установлено, что одной из основных причин низкой долговечности в эксплуатации нежестких дорожных одежд является высокий уровень их вибрационного нагружения. Отсутствие учета этого вида нагружения приводит к тому, что недостаточные прочностные показатели дорожных одежд закладываются еще на стадии проектирования.

2. Разработанный метод виброзащиты позволил сформировать в дорожной конструкции

колебательные процессы с противофазным действием динамических сил и за счет этого достичь пониженных вибрационных нагрузений.

3. Выполненные оценки прогнозной долговечности различных дорожных конструкций, находящихся в эксплуатации, показали почти полное совпадение прогнозных и эксплуатационных долговечностей, если учитывать собственную вибрацию дорожных конструкций с асфальтобетонными покрытиями в общем числе воздействий на конструкцию. Эти прогнозы могут быть использованы при планировании ремонтных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. The AASHO Road Test. Report 5-Pavement Research. – USA: Washington, 1962. – 300 p.
2. Иванов, Н. Н. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / Н. Н. Иванов. – М.: Транспорт, 1973. – 328 с.
3. Бабков, В. Ф. Проектирование автомобильных дорог: в 2 ч. / В. Ф. Бабков, О. В. Андреев. – М.: Транспорт, 1987. – Ч. 2. – 367 с.
4. Радовский, Б. С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.03 / Б. С. Радовский. – Киев, 1982. – 436 с.
5. Золотарев, В. А. Концепция вечных дорожных одежд / В. А. Золотарев // Автомобильные дороги. – 2013. – № 2. – С. 60–63.
6. Осиновская, В. А. Вертикальная динамика автомобильной дороги при ударном воздействии автомобиля / В. А. Осиновская // Колебания и волны в дорожных конструкциях / А. В. Смирнов. – Омск: СибАДИ, 2006. – С. 82–106.
7. Осиновская, В. А. Вибрационное разрушение нежестких дорожных одежд / В. А. Осиновская. – М.: Техполиграфцентр, 2008. – 203 с.
8. Осиновская, В. А. Методика проектирования нежестких дорожных одежд при учете вибрационного нагружения / В. А. Осиновская // Интернет-журнал «Наукоеведение». – 2012. – № 4 (13) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/4vn412.pdf>.
9. Илиополов, С. К. Долговечность асфальтобетонных покрытий в условиях роста динамических воздействий транспортных средств / С. К. Илиополов, Е. В. Углова // Автомобильные дороги и мосты. – 2007. – Вып. 4. – 84 с.
10. Осиновская, В. А. Моделирование частотного спектра колебаний дорожной конструкции автомобильной дороги / В. А. Осиновская // Вестник МАДИ. – 2013. – Вып. 4 (35). – С. 72–77.
11. Осиновская, В. А. Вопросы моделирования колебаний нежестких дорожных одежд / В. А. Осиновская // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2012. – № 4. – С. 26–28.
12. Осиновская, В. А. Вибрационное нагружение нежестких дорожных одежд / В. А. Осиновская // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014. – Вып. 1 (33). – С. 34–44.
13. Осиновская, В. А. Влияние вибрации нежестких дорожных одежд на их прочность / В. А. Осиновская // Интернет-журнал «Наукоеведение». – 2014. – № 5 (24) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/23KO514.pdf>.
14. Осиновская, В. А. Пути повышения долговечности нежестких дорожных одежд / В. А. Осиновская // Вестник МАДИ. – 2011. – № 4 (27). – С. 77–80.
15. Конструкция дорожной одежды: пат. 2399715 С1 Рос. Федерации: МПК⁷ E01C / В. А. Осиновская; дата публ. 20.09.2010.

Поступила 07.07.2015

REFERENCES

1. Highway Research Board (HRB). (1962) The AASHO Road Test. Report 5-Pavement Research. Washington, National Academy of Sciences – National Research Council. 300 p.
2. Ivanov, N. N. (1973) *Designing and Calculation of Flexible Pavement*. Moscow, Transport. 328 p. (in Russian).
3. Babkov, V. F., & Andreyev, O. V. (1987) *Design of Highways. Parts 2*. Moscow, Transport. 367 p. (in Russian).
4. Radovsky, B. S. (1982) *Teoreticheskie Osnovy Konstruirovaniia i Rascheta Nezhestkikh Dorozhnykh Odezhd na Vozdeistvie Podvizhnykh Nagruzok. Dis. d-ra tekhn. nauk* [Theoretical Principles on Designing and Calculation of Flexible Pavements in Respect of Mobile Loading. Abstract of Ph.D. Thesis in Engineering Science]. Kiev. 436 p. (in Russian).
5. Zolotarev, V. A. (2013) Concept of Eternal Pavement. *Avtomobilnye Dorogi* [Automobile Roads], 2, 60–63 (in Russian).
6. Osinovskaya, V. A., & Smirnov, A. V. (2006) Vertical Dynamics of the Highway in Case of Vehicle Impact Effect. *Fluctuations and Waves in Road Structures*. Omsk: Siberian Automobile and Highway Institute, 82–106 (in Russian).
7. Osinovskaya, V. A. (2008) *Vibration Destruction of Flexible Pavements*. Moscow, Publishing House “Tekhpolygraphtsentr”. 203 p. (in Russian).
8. Osinovskaya, V. A. (2012) Methodology for Designing Flexible Pavements while Taking into Account Vibration Loading. *Naukovedenie* [Science Studies], 4 (13). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/4vn412.pdf> (in Russian).
9. Iliopolov, S. K., & Uglova, E. V. (2007) Durability of Asphalt-Concrete Pavements in Case of Increase of Dynamic Actions Caused by Transport Facilities. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty* [Automobile Roads and Bridges], 4, 84 p. (in Russian).
10. Osinovskaya, V. A. (2013) Modeling of Frequency Fluctuation Range for Road Structure of Highway. *Vestnik Moskovskogo Avtomobilno-Dorozhnogo Instituta (Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)* [Moscow Automobile and Road Construction University – MADI], 4 (35), 72–77 (in Russian).
11. Osinovskaya, V. A. (2012) Problems on Modeling of Flexible Pavement Fluctuations. *Nauka i Tekhnika v Dorozhnoy Otrastli* [Science and Technique in Road Sector], 4, 26–28 (in Russian).
12. Osinovskaya, V. A. (2014) Vibration Loading of Flexible Pavements. *Nauchnyi Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta. Stroitelstvo i Arkhitektura* [Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture], 1 (33), 34–44 (in Russian).
13. Osinovskaya, V. A. (2014) Influence of Flexible Pavements Vibration on their Durability. *Naukovedenie* [Science Studies]. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/23KO514.pdf> (in Russian).
14. Osinovskaya, V. A. (2011). Options for Increase of Flexible Pavements Durability. *Vestnik Moskovskogo Avtomobilno-Dorozhnogo Instituta (Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)* [Moscow Automobile and Road Construction University – MADI], 4 (27), 77–80 (in Russian).
15. Osinovskaya, V. A. (2010) Design of Pavement. Patent Russian Federation No 2399715 C1. (in Russian).

Received 07.07.2015

ТЕХНОЛОГИЯ УСТРОЙСТВА ОБЛЕГЧЕННЫХ ПУСТОТООБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ АРМАТУРЫ В ПОСТРОЕЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ С. Н.¹⁾, асп. ПЕРЕДКОВ И. И.¹⁾

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

E-mail: sleonovich@mail.ru

Представлена технология устройства облегченной пластиковыми пустотообразователями предварительно напряженной в построечных условиях плиты перекрытия. Эффективность такого конструктивного решения обусловлена действием предварительного обжатия бетона растянутой зоны при снижении собственного веса конструкции за счет устройства пустот. Приведена классификация систем предварительного напряжения и даны рекомендации по выбору системы в зависимости от особенностей проектируемой конструкции. Рассмотрены основные изделия и материалы, необходимые для производства работ, требования к напрягаемой канатной арматуре, ее основные характеристики.

Принципиальная схема облегченного предварительно напряженного перекрытия предусматривает устройство так называемого скрытого кессона. Пучки арматурных канатов размещаются в пределах полос, проходящих над опорами (над вертикальными несущими конструкциями каркаса), а в ячейках между полосами устраиваются пустоты посредством закладки полых пластиковых изделий, объединенных каркасами. Приведены технологическая последовательность операций при устройстве облегченного предварительно напряженного перекрытия и схемы размещения оборудования, а также характеристики применяемых агрегатов (проталкивающее приспособление для арматурных канатов, гидравлический домкрат с питающим гидравлическим насосом, смесительная станция, инъекционный насос и др.). Даны рекомендации по производству работ в зимнее время. Рассмотрены вопросы контроля качества поступающих на строительную площадку материалов и изделий, а также непосредственно работ по предварительному напряжению пустотной плиты.

Выполненный анализ технологии позволяет сделать вывод о ее высокой пригодности для импортозамещения. Следует рассмотреть возможность применения технологии на объектах различного назначения в сравнении с другими конструктивными решениями по основным технико-экономическим показателям.

Ключевые слова: пустотообразователи, железобетонные плиты перекрытия, предварительно напряженная арматура, технология устройства.

Ил. 6. Библиогр.: 10 назв.

TECHNOLOGY FOR INSTALLATION OF REINFORCED CONCRETE FLOOR SLABS LIGHTENED BY CORE DRIVERS WITH PRELIMINARY REINFORCEMENT STRESS

LEONOVICH S. N.¹⁾, PEREDKOV I. I.¹⁾

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

The paper presents technology for installation of floor slabs lightened by plastic core drivers which are preliminary stressed under construction conditions. Efficiency of such constructive solution is justified by the action of preliminary concrete compression in the tensile zone while reducing structure dead weight due to void arrangement. The paper provides classification of systems for preliminary stress and contains recommendations on selection of the system depending on peculiar features of the designed construction. Main products and materials required for execution of works, requirements to stressed wire rope reinforcement, its main characteristics have been considered in the paper.

Principal diagram of the lightened preliminary stressed slab stipulates arrangement of so called dummy caisson. Strands of reinforcement ropes are located within the framework of bars passing over supporting structures (over vertical bearing structures of the framework) and voids are formed in the cells between bars by laying hollow plastic items joined together by a cage. The paper presents technological sequence of operations required for arrangement of the lightened preliminary stressed slab, schemes for equipment arrangement and characteristics of the applied devices and units (pushing device for reinforcement ropes, hydraulic jack with delivery hydraulic pump, mixing station, injection pump and others). Recommendations have been given for execution of works in cold weather. The paper considers problems pertaining to control quality of the materials and items which are supplied to a construction site and directly execution of works on preliminary stress of a cellular slab.

The executed analysis of technology permits to conclude that it is characterized by high level of applicability for import substitution. It is necessary to consider the possibility to apply the technology at objects of various application while comparing it with other constructive solutions according to the main technical and economic indices.

Keywords: core drivers, reinforced concrete floor slabs, preliminary stressed reinforcement, technology of arrangement.

Fig. 6. Ref.: 10 titles.

Область применения. Технология предварительного напряжения арматуры в построечных условиях находит свое применение при строительстве зданий с монолитным рамным и рамно-связевым каркасами. Предварительное напряжение плит перекрытия и покрытия значительно повышает трещиностойкость и жесткость данных конструкций, что в сочетании с использованием высокопрочных арматуры и бетона позволяет уменьшить сечения изгибаемых элементов, снижая таким образом собственный вес каркаса здания, а также увеличить пролеты (разредить сетку вертикальных несущих конструкций). Помимо свободной планировки здания и рационального использования внутреннего объема с меньшим числом колонн и диафрагм жесткости, происходит упрощение и удешевление конструкций фундаментов здания, сокращаются сроки строительства и затраты на последующую его эксплуатацию.

Современные системы предварительного напряжения в построечных условиях позволяют выполнять армирование перекрытий и покрытий сложных очертаний, детали и узлы систем достаточно универсальны и могут применяться для реализации самых нетривиальных проектов. В зависимости от выбора используемой технологии постнапряжения возможно устройство как плоских, так и балочных (в том числе кессонных) перекрытий и покрытий. Выбор конструктивного решения определяется геометрией возводимого здания, величинами перекрываемых пролетов и действующими нагрузками.

При расчете предварительно напряженных конструкций действуют все требования, касающиеся материалов, основ проектирования и конструирования, предъявляемые к конструкциям, выполненным из бетона [1]. Силовое воздействие, оказываемое на конструкцию канатами системы предварительного напряжения, рассматривается как внешнее нагружение, которое может моделироваться как:

- предварительное обжатие бетона;
- разгружающее усилие;
- разгружающий момент [2].

Разгружающее действие предварительного напряжения оказывает значительное влияние

на результаты расчета по прочности сечения при действии изгибающих моментов и позволяет не только сократить количество устанавливаемой ненапрягаемой арматуры, но и в ряде случаев уменьшить сечение элементов перекрытия. Учет предварительного обжатия при расчете конструкции по прочности при местном срезе [1, п. 7.4.3] и при действии поперечных сил [1, п. 7.2] позволяет говорить о более высокой прочности конструкций с предварительным напряжением в сравнении с конструкциями без него. Однако зачастую необходимость устройства капителей плит или установки большого количества поперечного армирования не исключается. Ввиду того что значительную часть нагрузки на монолитную железобетонную плиту составляет ее собственный вес, целесообразным является его снижение при сохранении прочностных и жесткостных характеристик конструкции.

Достаточно рациональный способ облегчения монолитного перекрытия – устройство в нем пустот путем установки полых пустотообразователей сферической или иной формы из переработанного полиэтилена. Принципиальная схема такой конструкции приведена на рис. 1. Пустотообразователи поставляются объединенными в блоки арматурным каркасом, который служит для их фиксации на сетках нижнего армирования перекрытий. Свободная и достаточно простая установка таких элементов в сочетании с гибкостью технологии постнапряжения позволяет производить устройство плоских облегченных монолитных перекрытий. Прочность при действии изгибающих моментов в пролете обеспечивается работой сжатого бетона и предварительно напряженной или ненапрягаемой арматуры в сочетании со снижением собственного веса перекрытия. Прочность при действии изгибающих моментов и поперечных сил при местном срезе достигается постановкой каркасов поперечной арматуры (типа Reikko и прочих подобных, либо изготовленных в построечных условиях). Причем пустотообразователи в пределах периметра, где возможен местный срез, не устанавливаются.

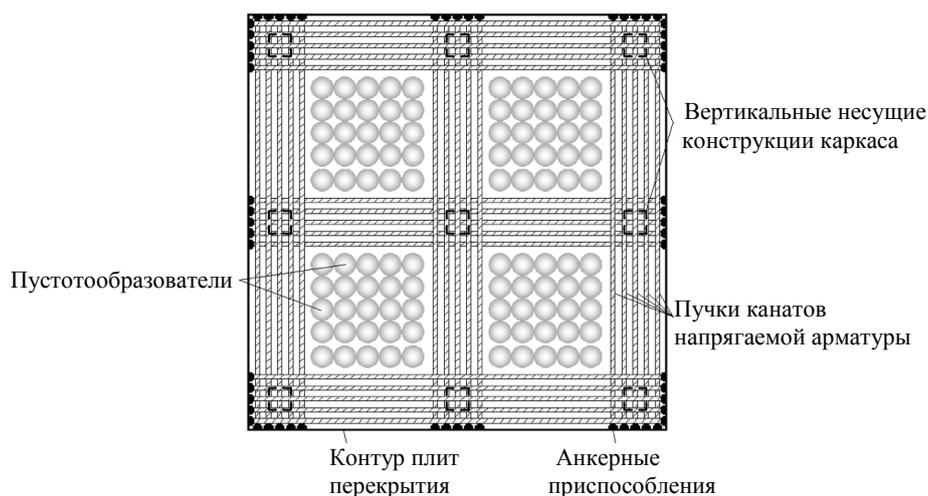


Рис. 1. Принципиальная схема облегченного постнатянутого перекрытия

Устройство облегченных пустотообразователями предварительно напряженных плит перекрытия и покрытия целесообразно выполнять при возведении каркасов зданий различного назначения и усилении существующих конструкций. Улучшение планировки и более рациональное использование внутреннего пространства достигаются для всех типов зданий. Снижение собственного веса каркаса в большей степени проявится при возведении высотных зданий ввиду общей массивности каркаса и большего количества плит перекрытия. Однако для зданий меньшей этажности снижение нагрузок также значительно.

Для каждого возводимого объекта должен выполняться сравнительный анализ возможных конструктивных решений, при котором основными параметрами, определяющими выбор того или иного решения, становятся материальные и временные затраты, а также надежность и долговечность здания. Устройство плоского облегченного перекрытия вместо решения с балками выглядит более технологичным за счет упрощения работ по устройству опалубки и монтажу арматуры. Получаемые плоские потолки помещений позволяют значительно упростить и удешевить процесс прокладки коммуникаций и отделочные работы. Более эффективное использование характеристик строительных материалов сокращает расход стали и бетона, а повышенные жесткость и трещиностойкость обеспечивают надежность конструкций перекрытий при их эксплуатации.

Также следует упомянуть снижение затрат на электропрогрев бетона при бетонировании в зимнее время менее массивных, в сравнении

с традиционными, пустотных конструкций. Ввиду применения пустотообразователей из переработанного полиэтилена и снижения объема бетона, а также сокращения расхода электроэнергии на прогрев в зимнее время процесс возведения зданий с облегченными пустотными предварительно напряженными перекрытиями оказывает меньшее влияние на окружающую среду.

Системы постнатяжения монолитных железобетонных перекрытий. Общая классификация систем предварительного напряжения основывается на способе создания предварительного обжатия, степени обжатия, способе размещения напрягающих элементов [3–5]. В статье рассматривается лишь способ натяжения канатной арматуры на бетон монолитной конструкции, имеющий достаточную для восприятия данного воздействия прочность. Поэтому классификация систем имеет некоторую специфику.

В зависимости от наличия сцепления между арматурной прядью и бетоном конструкций различают системы со сцеплением (bonded) и без сцепления (unbonded) арматуры с бетоном. При отсутствии сцепления между прядью и бетоном передача усилия предварительного обжатия осуществляется посредством анкерных устройств. Поэтому особенно пристальное внимание должно быть уделено как качеству данных компонентов системы, так и защите анкерных зон от коррозии, обеспечению достаточной прочности бетона в местах передачи нагрузки. В случае, когда прядь имеет сцепление с окружающим бетоном, передача обжимающего усилия осуществляется по всей длине пряди на раствор инъецирования каналов.

Известны также системы с расположением арматуры вне бетонного сечения. Данные решения используются для устройства конструкций усиления, при армировании мостов и путепроводов. Следует отметить, что в случае применения таких решений необходима тщательная защита канатов от коррозии, особенно в условиях действия агрессивных сред. Актуальна также проблема обеспечения достаточного предела огнестойкости таких конструкций.

В зависимости от типа конструкции и количества требуемой арматуры различают системы с одиночными прядями, расположенными с определенным шагом (monostrand), и с пучком прядей (multistrand). Системы с одиночными прядями находят применение при устройстве плоских безбалочных перекрытий при ячейке здания (8×8)–(10×10) м. Системы с пучками прядей применяются при армировании большепролетных балок перекрытий либо участков с высокой плотностью армирования [6].

Рассмотрим материалы и изделия, применяемые для устройства постнапряжения с использованием систем monostrand и multistrand [7, 8].

Материалы и изделия системы постнапряжения monostrand. Компоненты системы постнапряжения monostrand должны поставляться на строительную площадку в сборе в виде бухт арматурных прядей, комплектующих закладными деталями с направляющими трубками, цангами, пластиковыми нишеобразователями и защитными колпаками, как показано на рис. 2. Каждая бухта маркируется прочно закрепленным ярлыком, позволяющим точно идентифицировать прядь и установить ее в соответствии с проектной документацией.

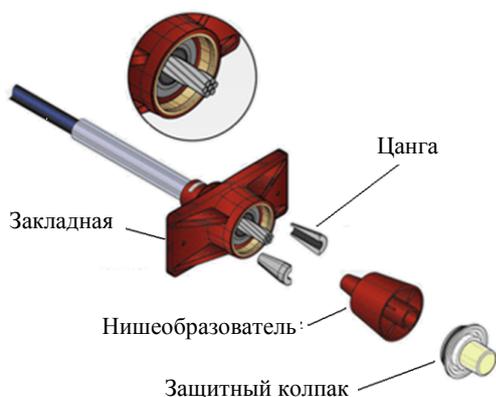


Рис. 2. Детали системы постнапряжения monostrand

Арматурная прядь в индивидуальной оболочке со смазкой – семипроволочный арматурный канат класса S1400 или иного, номинальным диаметром 15,5–15,7 мм, шаг свивки проволок 220–280 мм, максимальное нормативное усилие в пряди (f_m) до 280 кН, нормативное усилие в пряди при условном пределе текучести ($F_{p0,1k}$) 230–240 кН, общее минимальное удлинение при максимальной нагрузке 3,5 %.

Максимальная релаксация:

70 % f_m при 20 °С (240h) – 2,5 %;

80 % f_m при 20 °С (240h) – 4,5 %;

70 % f_m при 40 °С (240h) – 3,0 %.

Закладная деталь изготавливается из ковкого чугуна с пластинчатым графитом EN 6JL-250 EN 1561 или с аналогичными свойствами. Для закусывания цанги в закладной детали размещают втулку из легированной цементированной стали NF EN 10084. Форма закладной детали должна обеспечивать ее надежную анкеровку в теле плиты и удобство крепления к арматурным каркасам. Для исключения изломов в месте входа пряди в закладную деталь устанавливают стальные либо пластиковые направляющие трубки.

Цанги применяют конусные трех- либо двухлепестковые, с резьбой в отверстии для надежного заклинивания арматурного каната. Они изготавливаются из легированной цементированной стали NF EN 10084, как и втулки в закладной детали.

Нишеобразователи пластиковые, размер их должен обеспечивать получение в торце бетонизируемой конструкции ниши, достаточной для размещения носа гидравлического домкрата. Могут быть как съёмными, многократного использования, так и одноразовыми.

Защитный навинчиваемый колпак служит для защиты конца арматурного каната после натяжения, изготавливается из пластмассы.

Материалы и изделия систем multistrand. Анкерные устройства системы multistrand (рис. 3) служат для передачи на бетон конструкции усилия предварительного обжатия от пучка прядей. Нагрузка, приходящаяся на данный узел, достаточно велика. Поэтому такие изделия имеют дополнительные передаточные поверхности и могут комплектоваться дополнительным спиральным элементом армирования.



Рис. 3. Принципиальная схема анкерного узла системы multistrand

Непосредственно закладная деталь имеет форму раструба с развитой наружной поверхностью, изготавливается из ковкого чугуна с пластинчатым графитом по EN 6JL-250 EN 1561. Для упрощения процесса нагнетания инъекционной смеси в канал целесообразно комплектовать закладную деталь съемным штуцером. Крепление арматурных канатов для передачи обжимающего усилия через закладную деталь на бетон осуществляется в анкерном блоке круглой формы с отверстиями по числу натягиваемых канатов. Анкерный блок должен обеспечивать надежное закусывание цапг, поэтому он изготавливается из легированной цементованной стали NF EN 10084 обработанной, цианированной и закаленной, или другой с аналогичными свойствами. Из этого же материала изготавливаются и цапги, имеющие форму усеченного конуса, разделенного на два или три лепестка. Внутреннее отверстие цапги снабжается резьбой для надежной фиксации каната.

Оболочки-каналообразователи, прикрепляемые концами к раструбам закладных деталей, служат для размещения арматурных канатов в теле конструкции после бетонирования. Они изготавливаются путем непрерывной навивки и сварки стальной ленты, либо из пластика. Оболочки должны быть герметичны и не иметь деформаций в процессе их транспортировки, монтажа и последующего бетонирования конструкции.

Штуцеры инъектирования служат для выпуска воздуха, вытесняемого раствором из канала в процессе инъектирования. Они закрепляются в отверстие в оболочке и имеют гибкий конец-патрубок, выводимый из тела забетонированной конструкции.

Арматурная прядь в индивидуальной оболочке со смазкой аналогична арматурным канатам систем monostrand.

Цементный раствор для инъектирования каналов должен обеспечивать достаточную для нагнетания его в канал подвижность на протяжении всего процесса инъектирования, а также сплошное заполнение всех полостей. Расслоение его с отстаиванием линз воды недопустимо, поэтому приготовление такого раствора осуществляется при минимальном водоцементном отношении и с добавлением суперпластификатора.

Материалы и изделия для устройства пустот в монолитном перекрытии. В зависимости от производителя пустотообразователи могут иметь различия в геометрических размерах и некоторые конструктивные особенности. Однако общая концепция остается неизменной.

Пустотообразователь представляет собой полую оболочку сферической или уплощенной формы из переработанного полиэтилена. Форма и размеры применяемых пустотообразователей определяются толщиной армируемой конструкции. Так, одним из ведущих поставщиков комплектующих для облегченных перекрытий – компанией Sobiax (Швейцария) – пустотообразователи в виде модулей (длиной 2500 мм) предлагаются в двух исполнениях: Eco-line – для плит толщиной 30–60 мм и Slim-line – для плит толщиной 20–35 мм.

Модуль представляет собой ряд пустотообразователей, объединенных легким арматурным каркасом. Каркас служит не только для укрупнения сборочной единицы (что ускоряет монтаж), он препятствует всплытию полых элементов при бетонировании, которое осуществляется в два этапа.

Выбор системы предварительного напряжения для устройства, облегченного пустотообразователями перекрытия. При устройстве плоского постнапряженного перекрытия возможно использование как систем постнапряжения monostrand с одиночными прядями, так и multistrand с пучками прядей. Выбор того или иного решения определяется в ходе сравнения вариантов по их экономичности и технологичности.

В общем случае при строительстве общественных зданий различного назначения (торгово-развлекательные комплексы, паркинги и пр.) целесообразно устройство перекрытий с использованием систем multistrand. Укладка пучков прядей в пределах некоторой полосы с облегчением при помощи пустотообразователей пролетов между полосами позволяет получить, по сути, балочную клетку с достаточно большой величиной пролета, жесткую, с высокой трещиностойкостью. При этом конструкция имеет плоские верхнюю и нижнюю грани, что упрощает опалубочные работы. Как было сказано выше, получаемый плоский потолок предпочтительнее с точки зрения прокладки коммуникаций под ним и отделки. Поэтому далее рассмотрим процесс устройства облегченного перекрытия с армированием пучками прядей.

Цикл работ по устройству облегченного постнапряженного перекрытия (multistrand). Цикл работ по устройству облегченного постнапряженного перекрытия включает в себя следующие операции:

- 1) опалубочные работы;
- 2) раскладку нижней ненапрягаемой продольной арматуры перекрытия;
- 3) установку закладных деталей и оболочек-каналообразователей;

4) установку штуцеров инъектирования и герметизацию всех стыков;

5) монтаж модулей пустотообразователей;

6) раскладку верхней продольной ненапрягаемой арматуры;

7) бетонирование захватки – 1-й этап – первый слой с покрытием нижнего стержня каркасов, объединяющих пустотообразователи;

8) бетонирование – 2-й этап – до проектной отметки верха плиты;

9) протягивание канатов внутрь оболочек-каналообразователей;

10) натяжение прядей после набора бетоном конструкции передаточной прочности;

11) инъектирование каналов цементным раствором;

12) установку защитных колпаков для консервации анкерных приспособлений с целью защиты их от коррозии;

13) распалубку перекрытия.

При устройстве облегченного предварительно напряженного перекрытия применяются решения с одиночными прядями (monostrand) и с пучками прядей (multistrand).

Процедуры протягивания канатов и их натяжения. Протягивание канатов осуществляется при помощи проталкивающего приспособления, обеспечивающего равномерную и непрерывную подачу пряди в канал (рис. 4). Бухта с прядью устанавливается на горизонтальную ось (разматывающее приспособление), и канат по ряду роликов подводится к проталкивающему приспособлению. Для того чтобы исключить заклинивание конца каната в канале, на него наживляют гладкий стальной накопчик.



Рис. 4. Размещение оборудования при протягивании прядей

Процедура натяжения прядей. Технологическая схема операции натяжения прядей приведена на рис. 5.

Для натяжения арматурных канатов используются гидравлические домкраты двойного действия. При натяжении канатов систем с относительно небольшим количеством прядей, приходящихся на одну закладную (до 7), целесообразно использовать домкраты для одновременного натяжения единственной пряди (монопрядные), развивающие усилие до 260–280 кН. Рабочее давление 70–75 МПа, ход поршня 200 мм, масса домкрата до 15–18 кг. При потребности в большей производительности используются домкраты для одновременного натяжения пучка прядей (от 4 до 19), развивающие усилие до 5300 кН при рабочем давлении 70–75 МПа и ходе поршня 200–400 мм. Данные механизмы могут иметь массу до 800 кг.

Насосные гидравлические станции должны обеспечивать пропускную способность не более 6 л/мин. Для контроля давления в гидравлической системе насосные станции оснащают манометром.

Соединение всех компонентов гидравлической системы осуществляется при помощи шлангов высокого давления, оснащенных вентилями.

В процессе производства работ требуются некоторые дополнительные приспособления: траверсы для подъема и перемещения бобин с канатами, разматывающие устройства (горизонтальная ось, на которой разматывается бобина), шаблоны для проверки проходимости канала, наконечники для облегчения проталкивания пряди в канал. Для замены каната требуются домкрат с ходом 300 мм и более и куплер для прикрепления конца новой пряди к концу заменяемой.

Защита анкерных зон и сохранение свободных концов прядей с активной стороны обеспечиваются установкой защитных колпаков, заполняемых парафином. Колпаки должны иметь достаточную механическую прочность и исключать проникновение внутрь влаги и последующую коррозию.

Процедура инъецирования каналов цементным раствором. Приготовление инъекционного раствора производится при помощи смесительной станции, снабженной электронным блоком управления, который позволяет точно соблюдать длительность приготовления раствора по рецептуре (рис. 6).

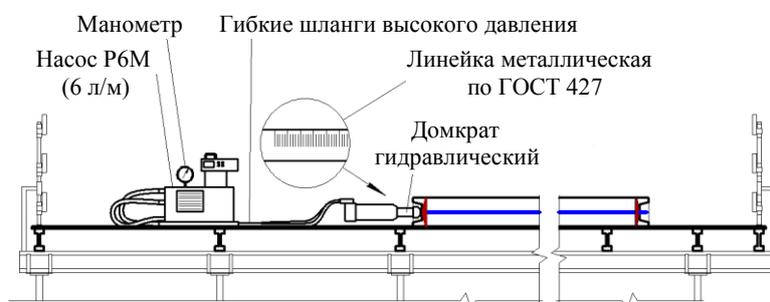


Рис. 5. Технологическая схема операции натяжения прядей

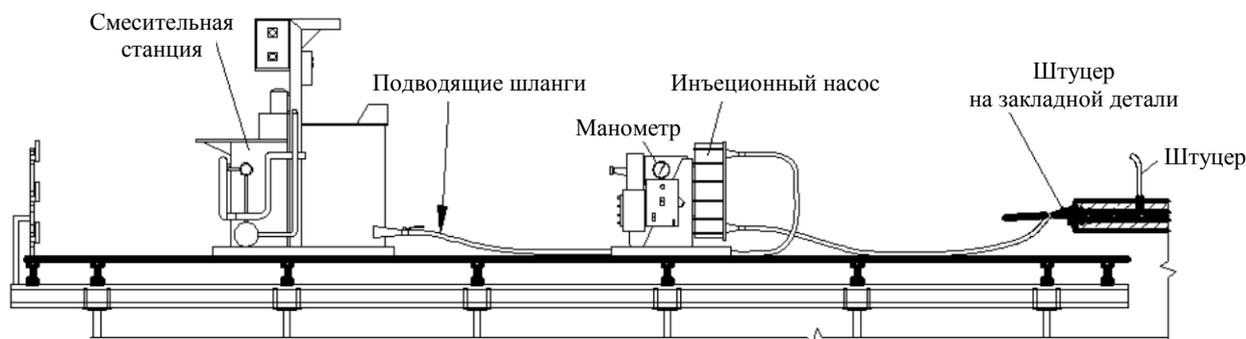


Рис. 6. Размещение оборудования при операции инъецирования каналов цементным раствором (смесительная станция и насос – отдельные агрегаты)

В смесительный бак помещается требуемое количество цемента, а в дозировочный бак для воды – вода. Добавка-суперпластификатор может поставляться в водорастворимых мешках. Для удобства дозировки зачастую водорастворимая упаковка содержит количество добавки на один мешок цемента. Смесительные станции имеют также накопительно-смесительный бак, где приготовленный раствор сохраняется непрерывно помешиваемым в процессе инъектирования.

В некоторых случаях производители совмещают канал со смесительной станцией в единый агрегат, либо же данные устройства разделяются, и питание растворонасоса осуществляется от накопительного бака. Основное требование к смесительной станции – возможность приготовления достаточного количества раствора с соблюдением требований рецептуры. Растворонасос должен обеспечивать равномерное нагнетание смеси со скоростью 25–40 л/мин и оснащаться манометром для контроля давления в системе.

Температура в зоне производства работ в зимнее время не должна опускаться ниже 5 °С в течение 72 ч после окончания процедуры инъектирования. В противном случае необходимо обеспечить выполнение ряда мероприятий по повышению температуры приготовляемого раствора, по предварительному прогреву оборудования и устройству электропрогрева каналов.

Контроль качества производства работ. Мероприятия по контролю качества производства работ должны включать процедуры технического и авторского надзоров в соответствии с действующими в Республике Беларусь ТНПА, а также приемку готовой конструкции.

Качество исходных материалов и комплектующих должно гарантироваться поставщиком и подтверждаться сертификатами. Параметры поставляемых деталей должны быть указаны в паспортах и соответствовать требованиям проекта. Производителям работ необходимо соблюдать правила хранения, транспортировки и использования материалов.

Каждый этап производства работ, включая раскладку ненапрягаемой арматуры, установку

каналообразователей, закладных деталей, пустотообразователей и т. д., должен подвергаться процедуре авторского надзора с внесением замечаний в журнал авторского надзора и их своевременным устранением. Скрытые работы следует подвергать приемке с оформлением соответствующего акта.

В процессе производства работ выполняется ряд мероприятий по контролю исправности гидравлического и инъекционного оборудования, контролю правильности монтажа компонентов системы постнапряжения, герметичности каналов и пр. Также контролю подвергается инъекционная смесь на стадии приготовления как для определения оптимальной дозировки ингредиентов, так и для контроля ее прочности. Данные виды контроля приводятся в технологической карте на устройство облегченного предварительно напряженного перекрытия и являются обязательными к выполнению.

Бетон готовой конструкции и напрягаемые арматурные канаты подвергаются испытаниям неразрушающими методами. Целесообразно также устройство систем неразрушающего мониторинга для наблюдения за напряженно-деформированным состоянием постнапряженных конструкций [9, 10].

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрено применение технологии постнапряжения монолитных железобетонных плит перекрытия совместно со снижением собственного веса данных конструкций путем установки полых пластиковых пустотообразователей. Приведены основные требования к материалам и изделиям, необходимым для устройства пустот в теле конструкции и предварительного напряжения плит. Представлены технологические схемы операций, комплект применяемого оборудования, даны рекомендации по контролю качества производства работ.

2. Анализ технологии позволяет сделать вывод о пригодности ее для импортозамещения и возможности широкого применения облегченных, предварительно напряженных перекрытий при обосновании и сравнении с другими конструктивными решениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конструкции бетонные и железобетонные: СНБ 5.03.01–02. – Введ. 20.06.2002. – Минск: Минстрой-архитектуры, 2003. – 140 с.
2. Портаев, Д. В. Расчет и конструирование монолитных предварительно напряженных конструкций гражданских зданий / Д. В. Портаев. – М.: Изд-во ассоциации строит. вузов, 2011. – 247 с.
3. Дрозд, Я. И. Предварительно напряженные железобетонные конструкции / Я. И. Дрозд, Г. П. Пастушков. – Минск: Вышэйш. шк., 1984. – 208 с.
4. Леонгардт, Ф. Напряженно-армированный железобетон и его практическое применение / Ф. Леонгардт; пер. с нем. В. К. Житомирского. – М.: Стройиздат, 1957. – 588 с.
5. Латыш, В. В. Технология предварительного напряжения монолитных железобетонных конструкций в построечных условиях: учеб. пособие / В. В. Латыш, С. Н. Леонovich. – Минск: БНТУ, 2006. – 53 с.
6. Post-Tensioning Manual / T. L. Neff [et al.]. – 6th Edition. – PTI, 2006. – 354 p.
7. Следящие тест-системы [Электронный ресурс] / ООО «Следящие тест-системы». – 2008. – Режим доступа: <http://www.sts-hydro.ru/technologies/posttensioning/>.
8. L'École Nationale des Ponts et Chaussées [Электронный ресурс] / École des Ponts ParisTech. – 2012. – Режим доступа: <http://www.enpc.fr/grands-hommes/freyssinet>.
9. Звездов, А. И. Предварительно напряженный железобетон: состояние и перспективы развития / А. И. Звездов, К. В. Михайлов, Ю. С. Волков // НИИЖБ [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.niizhb.ru/statzvezdov3.htm>.
10. Лешкевич, О. Н. Современная практика возведения монолитных конструкций с преднапряжением в построечных условиях / О. Н. Лешкевич, А. И. Чубрик // Мастерская. – 2007. – № 1–2 (34–35). – С. 50–52.

Поступила 14.01.2014

REFERENCES

1. SNB [Construction Standards of the Republic of Belarus] 5.03.01–02. Concrete and Reinforced Concrete Structures. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2003. 140 p. (in Russian).
2. Portaev, D. V. (2011) *Calculation and Designing of Cast-in-Situ Preliminary Stressed Structures of Civil Buildings*. Moscow, Publishing House of Civil Engineering HEIs Association. 247 p. (in Russian).
3. Drozd, Ya. I., & Pastushkov, G. P. (1984) *Preliminary Stressed Reinforced Concrete Structures*. Minsk, Vysheyshaya Shkola. 208 p.
4. Leonhardt, F. (1957) *Stressed and Reinforced Concrete and its Practical Application*. Moscow, Stroyizdat. 588 p. (in Russian).
5. Latysh, V. V., & Leonovich, S. N. (2006) *Technology of Preliminary Stress of Cast-in-Situ Reinforced Concrete Structures under Construction Conditions*. Minsk: BNTU. 53 p. (in Russian).
6. Neff, T. L., Gupta, R. R., Fadi Alkhairi, Bondy, K. B., Barth, F. Bane, C., Rogers, J., Gauvreau, P., Goodyear, D., Close, S., Naaman, A., Plaehn, J., Krauthammer, T., Gustafarro, A., & Schokker, A. (2006) *Post-Tensioning Manual*. 6th Edition. PTI. 354 p.
7. *Tracing Test-Systems* (2008) Available at: <http://www.sts-hydro.ru/technologies/posttensioning/>. (in Russian).
8. *L'École Nationale des Ponts et Chaussées* (2012) Available at: <http://www.enpc.fr/grands-hommes/freyssinet>. (in Russian).
9. Zvezdov, A. I., Mikhailov, K. V., & Volkov, Yu. S. (2007) Preliminary Stressed Reinforced Concrete: Status and Prospects for Development. *NIIZhB* [Scientific-Research Institute of Reinforced Concrete]. Available at: <http://www.niizhb.ru/statzvezdov3.htm>. (in Russian).
10. Leshkevich, O. N., & Tchubrik, A. I. (2007) Modern Practice for Installation of Cast-in-Situ Structures with Preliminary Stress under Construction Conditions. *Masterskaya* [Workshop], 1–2 (34–35), 50–52 (in Russian).

Received 14.01.2014

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО КОНГЛОМЕРАТА МЕТОДОМ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

*Канд. хим. наук БОНДАРЕНКО С. Н.¹⁾, асп. ЧУЛКИН П. В.²⁾, канд. хим. наук РАГОЙША Г. А.³⁾,
студ. КОЛИКОВ А. О.¹⁾, канд. хим. наук БОНДАРЕНКО А. С.⁴⁾*

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

²⁾*Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь),*

³⁾*НИИ физико-химических проблем БГУ (Минск, Республика Беларусь),*

⁴⁾*Мюнхенский технический университет (Мюнхен, Германия)*

E-mail: Ander250@mail.ru

Одним из перспективных направлений в обеспечении сохранности и увеличения сроков службы дорожных одежд является строительство автомобильных дорог с цементобетонными покрытиями. Современные тенденции обеспечения качества дорожного строительства предусматривают необходимость контроля и управления процессами твердения и последующего разрушения материала при формировании и эксплуатации цементобетонного конгломерата, составляющего основу дорожного покрытия. Актуальность мониторинга процессов формирования и разрушения цементобетонных материалов показывает и многолетняя практика эксплуатации автомобильных дорог на их основе. В качестве инструмента для решения данной задачи предложен и опробован метод импедансной спектроскопии.

Для проведения испытаний изготавливали экспериментальные образцы цементобетона, в которых в качестве мелкого заполнителя использовали фракционированный кварцевый песок и гранитный отсев с размерами частиц от 0,63 до 2,50 мм. Изучены зависимости сопротивления (импеданса) от частоты переменного тока для образцов различной природы и гранулометрического состава. Комплексную величину импеданса измеряли с использованием потенциостата Gamry G300, а анализ спектров и расчет параметров эквивалентной схемы проводили с помощью программы EIS Spectrum Analyzer.

Сравнение спектров импеданса изготовленных образцов цементобетона позволило выявить тенденции изменения параметров спектра при твердении и последующем контакте с влагой для образцов каждого типа. Установлена эквивалентная электрическая схема, характеризующая физико-химические процессы, сопровождающиеся переносом заряда в цементобетонном конгломерате. Показана возможность использования импедансной спектроскопии для решения ряда актуальных задач в области технологии цементобетона, в частности связанных с применением техногенных отходов (гранитных отсеков в качестве мелкого заполнителя), а также оптимизации минерального и гранулометрического составов цементобетонной смеси для дорожных покрытий. Развитие подхода к исследованию свойств цементобетонных материалов на основе анализа спектров импеданса позволит количественно характеризовать протекающие в них процессы, в частности твердение и коррозию бетона.

Ключевые слова: цементобетон, импедансная спектроскопия, эквивалентная схема, мелкий заполнитель, твердение бетона, коррозия бетона, гранитный отсев, кварцевый песок, гранулометрический состав заполнителя.

Ил. 6. Библиогр. 18 назв.

INVESTIGATION OF CEMENT CONCRETE CONGLOMERATE SOLIDIFICATION PROCESS BY IMPEDANCE SPECTROSCOPY METHOD

*BONDARENKO S. N.¹⁾, CHULKIN P. V.²⁾, RAGOISHA G. A.³⁾,
KOLIKOV A. O.¹⁾, BONDARENKO A. S.⁴⁾*

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

²⁾*Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus),*

³⁾*Research Institute for Physical Chemical Problems Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus),*

⁴⁾*Munich Technical University (Munich, Germany)*

One of the most prospective directions in preservation and increase of service life of road pavements is a construction of automobile roads with cement concrete surface. Modern tendencies for provision of road construction quality presuppose a necessity to control processes of solidification and subsequent destruction of the material while forming and using cement concrete conglomerate being considered as a basic element of the road surface. Multiyear practical experience of automobile road operation using cement concrete pavements reveals an importance for monitoring such processes as formation and destruction of cement concrete materials. An impedance spectroscopy method has been tried out and proposed as a tool for solution of the given problem.

Experimental samples of cement concrete have been prepared for execution of tests, graded silica sand and granite chippings with particle size from 0,63 to 2,50 mm have been used as a fine aggregate in the samples. Dependencies of resistance (impedance) on AC-current frequency have been studied for samples of various nature and granulometric composition. The Gamry G300 potentiostat has been used for measurement of complex impedance value. A spectrum analysis and calculation of equivalent circuit parameters calculation have been carried out while using EIS Spectrum Analyzer program.

Comparison of impedance spectra for the prepared cement concrete samples have made it possible to reveal tendencies in changing spectrum parameters during solidification and subsequent contact with moisture in respect of every type of the sample. An equivalent electrical circuit has been developed that characterizes physical and chemical processes which are accompanied by charge transfer in cement concrete conglomerate. The paper demonstrates a possibility to use an impedance spectroscopy for solution of a number of actual problems in the field of cement concrete technology problems. Particularly, the problems are connected with usage of technogenic wastes (e. g. granite chippings as a fine aggregate) and optimization of mineral and granulometric mix composition for road pavement. Development of an approach for investigation of properties on cement concrete materials on the basis of an impedance spectrum analysis will permit quantitatively to characterize processes which are occurring in them including such processes as concrete solidification and corrosion.

Keywords: cement concrete, impedance spectroscopy, equivalent circuit, fine aggregate, concrete solidification, concrete corrosion, granite chippings, silica sand, aggregate granulometric composition.

Fig. 6. Ref. 18 titles.

Несмотря на определенные успехи в исследовании механизмов твердения вяжущих веществ, почти за столетний период их развития единая и общепризнанная теория еще не разработана [1]. До сих пор до конца не выявлены истинные механизмы процессов твердения цементов и природа сил, приводящих к синтезу и упрочнению структуры, формированию монолитного цементного конгломерата. Не выяснена также роль твердых минеральных заполнителей в развитии этих физико-химических процессов. Обычно исследователи отмечают два типа связей, формирующих прочность цементобетона, – физическое притяжение полярных продуктов гидратации при затворении цемента водой и Ван-дер-Ваальсовы силы [2, 3]. По мере развития процесса твердения, при уменьшении удельной поверхности новообразований и их срастании, прочность будет увеличиваться также за счет формирования сильных химических связей, несмотря на то что при перекристаллизации формирующегося базового каркаса могут проявляться процессы деструкции [4]. Можно ожидать, что образование гидратов происходит не только на поверхности частиц минералов, непосредственно входящих в состав цементного клинкера, но и на достаточно развитой поверхности частиц мелкого заполнителя. При этом поверхность частиц мелкого заполнителя не может оставаться химически инертной, а возможно, играет роль своеобразного катализатора процессов твердения. Существенную роль при твердении вяжущей цементобетонной системы может играть эпитаксиальное наращивание, хотя при этом не всегда

наблюдается структурное соответствие между мелким заполнителем и продуктами твердения (новообразованиями).

В действительности структура цементного клинкера характеризуется наличием кристаллов основных минералов, имеющих определенные размеры и соединенных промежуточным стекловидным веществом сложного состава. В зависимости от размера структурных элементов – кристаллов (кристаллитов) – и их взаиморасположения при данной степени измельчения соотношение площади, занимаемой индивидуальными минералами на поверхности цементных частиц, будет различным. С изменением степени измельчения может меняться также минералогический состав поверхности частиц и соответственно их активность. Таким образом, измельчение влияет и на активность частиц мелкого заполнителя. Поскольку все процессы гидролиза и гидратации полиминеральных компонентов цемента и мелкого минерального заполнителя в конечном счете происходят на границе контакта твердой фазы и воды затворения, основное значение для протекания процессов твердения имеет именно этот химический состав поверхности частиц, который принято называть действующим минералогическим составом. При этом существенную роль также играет величина удельной поверхности частиц мелкого заполнителя, которая зависит от степени их измельчения и химической природы [1–4].

Увеличение тонкости помола некоторым образом нивелирует неоднородность минерало-

гического состава отдельных частиц, вступающих в твердофазные реакции при твердении, и доводит локальный минералогический состав компонентов цементной смеси, реагирующей с водой, до предельного состояния, отвечающего стехиометрии состава, полученного расчетом. В реальной практике технологи, как правило, не обладают исчерпывающей информацией о химическом и фазовом составе цемента, о его полном минералогическом составе, степени кристалличности минералов-компонентов и вкладе стекловидной фазы. Обычно такого рода исходные данные ограничены кругом минералов, определяемых микроскопически, а именно силикатами и алюминатами кальция (C3S, C2S, C3A и др.). Кроме детального знания минералогического состава цемента, ключом к разрешению многих проблем в области технологии цементобетона может быть информация, полученная при изучении влияния размеров частиц мелкого заполнителя, величины его удельной поверхности и химической активности при их участии в формировании цементобетонного конгломерата. Подобная информация может быть определяющей при подборе оптимального компонентного состава.

Исследования процессов гидратации и твердения цементоводных систем с применением электрометрических методик (в частности, радиочастотной диэлектromетрии [5]) показали потенциальную возможность отслеживать динамику свободных носителей (ионов или полярных молекул) в твердеющей цементоводной системе по изменению диэлектрической проницаемости и сдвигу фазы электромагнитного поля. Установлена связь реального времени развития цементоводных систем с образованием ионно-молекулярных ассоциатов в граничных слоях цементных минералов и частиц заполнителя (например, кварцевого песка). Необходимо особо отметить, что граничные водные слои на поверхности раздела «цементные минералы (гидратные фазы) – вода затворения» соответствуют по толщине двойному электрическому слою, и поэтому можно считать, что свойства двойного электрического слоя – это свойства граничных слоев на поверхностях раздела цементных минералов. Двойному электрическому слою в жидкости соответствует аналогичный слой в приповерхностной области

твердого тела. На поверхности частиц заполнителя (например, кварца) при контакте с раствором также образуется проницаемый для ионов электролита слой (около 5 мкм), что исключает инертность поверхности и предполагает самое активное ее участие в развитии цементной дисперсии. Поверхность SiO₂ имеет измененную по сравнению с объемом структуру (эти изменения могут распространяться на глубину в 2–3 монослоя). Для ионных кристаллов (в клинкерных минералах преобладающими являются именно ионные связи) приповерхностный слой – это либо пористый полупроницаемый слой (за счет избирательного растворения в случае оксидов), либо слой с измененной концентрацией и топографией дефектов, а также с мозаичным распределением зарядов по знаку (как в случае гипса). В общих чертах процесс растворения твердых клинкерных минералов в жидкой фазе (воде) можно рассматривать как результат наложения двух процессов: разрушения твердофазной структуры (и отчасти ее диспергирование, это эндотермический процесс) и гидратации, сопровождающейся выделением теплоты (экзотермический процесс) [1–5].

Еще более информативной представляется возможность использования для изучения процессов гидратации и твердения цементобетонных систем новой, успешно развивающейся электрохимической методики – импедансной спектроскопии [6, 7]. Авторами сделана попытка оценить влияние минералогической природы и гранулометрического состава мелкого заполнителя на механизмы и схемы твердения цементобетонного конгломерата с использованием этой новой методики.

Образцы изготавливали в виде стандартных балочек размерами 40×40×160 мм, которые соответствовали общепринятым размерам образцов для испытаний цемента, но были некоторым образом модифицированы для реализации возможности проведения электрохимических измерений путем внедрения в цементобетонный материал стальных электродов.

В качестве мелкого заполнителя использовали фракционированный кварцевый песок и гранитные отсеивы с размерами частиц от 0,63 до 2,50 мм. Внешний вид частиц этих заполнителей представлен на рис. 1.

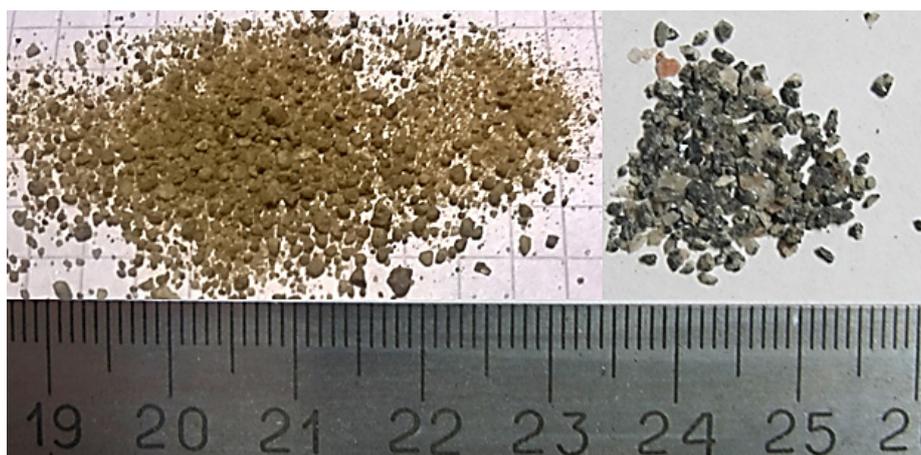


Рис. 1. Внешний вид частиц заполнителей: слева – кварцевый песок; справа – гранитный отсев
Fig. 1. View of filling particles: on the left – silica sand; on the right – granite chippings

Сравнение импедансных спектров (ИС) образцов цементобетона, полученных с использованием двух типов мелких заполнителей, выявило заметное различие их параметров, которое показывает, что метод ИС может быть информативным инструментом в изучении роли поверхностных и других физико-химических свойств мелкого заполнителя в процессах твердения цементобетонного конгломерата.

Определение закономерностей влияния мелких заполнителей, вступающих во взаимодействие с водой и клинкерными минералами в процессе затвердевания, с использованием ИС может способствовать решению ряда технических задач, актуальных для технологии цементобетона, в частности связанных с применением гранитных отсеков в качестве мелкого заполнителя и подбором оптимальных минералогического и гранулометрического составов цементобетонной смеси в целом.

Эффективность использования цементобетона в качестве покрытия автомобильных дорог зависит во многом от его инертности и стойкости по отношению к агрессивным факторам внешней среды, т. е. от коррозионной стойкости. Классическая схема коррозии цементного камня и цементобетона [8, 9] предполагает возможность протекания нескольких основных типов процессов: растворения в воде и вымывания некоторых составляющих компонентов цементного камня; процессов под действием вод, содержащих вещества, вступающие в химические реакции с составляющими цементного камня; процессов, которые приводят к отло-

жению малорастворимых продуктов и веществ, кристаллизующихся в порах и капиллярах, что вызывает значительные растягивающие напряжения, разрушающие цементный камень механически. Таким образом, в результате коррозионных преобразований происходит разрушение монолитной структуры материала: увеличивается пористость цементного камня, возникают внутренние напряжения, формируются микротрещины [10] и, следовательно, снижается его механическая прочность. В результате коррозионного разрушения материала снижаются его первоначальные эксплуатационные характеристики, что в конечном итоге существенно уменьшает устойчивость цементобетонного покрытия к интенсивным механическим нагрузкам.

Поскольку изменение механических свойств цементобетона является результатом протекания ряда скрытых химических и физико-химических процессов, для обеспечения контроля свойств цементобетонных покрытий необходимы методы мониторинга состояния материала и протекающих в нем изменений на ранних стадиях, предшествующих появлению признаков разрушения. Сложность решения данной задачи обусловлена тем, что эти процессы происходят внутри материала, состоящего из большого количества твердых фаз различных веществ, причем состав поверхностного слоя, доступного исследованию, может заведомо отличаться от состава глубинных слоев. Для получения информации о химических и физико-химических процессах, протекающих в объеме (глубо-

ко внутри) цементобетонного покрытия, необходимы чувствительные к этим процессам неразрушающие методы контроля. Одним из наиболее перспективных из них является метод электрохимической импедансной спектроскопии, который в последнее время активно используется в исследованиях коррозии строительных материалов, главным образом железобетона [11].

В литературе имеется информация о применении метода электрохимической импедансной спектроскопии для изучения процессов гидратации в цементном растворе [12, 13] и коррозии металлических конструктивных элементов железобетона [11]. Ранее [12] отмечалась сложность получения информации об изменении состояния бетона после его затвердевания. Однако в последнее время [14] показана возможность успешного получения информативных спектров электрохимического импеданса цементобетона на разных стадиях как в процессе затвердевания цементного раствора, так и в процессе хранения затвердевшего раствора портландцемента в течение последующего (28 сут.) месяца. Авторы [14] использовали в качестве электродов стальные пластины, которые помещались в раствор цемента и оставались в затвердевшем материале. В принципе, такой метод формирования электродов для последующего мониторинга свойств цементобетонного покрытия приемлем, но в [14] отсутствовала информация для интерпретации представленных результатов. В спектрах электрохимического импеданса различных объектов довольно часто преобладает отклик пограничного межфазного слоя, находящегося на поверхности электрода, причем величина потенциала электрода может сильно влиять на характер спектров импеданса [15–17]. В связи с этим имеется необходимость контроля как величины потенциала электродов, так и ее влияния на спектр импеданса. Поскольку в [14] использовали два электрода с неконтролируемыми значениями потенциала, опубликованные спектры фактически не привязаны к определенному объекту. Они могли характеризовать как бетон, так и зависящий от потенциала импеданс пограничного слоя на поверхности стального электрода. В последнем случае наблюдавшаяся динамика спектров импеданса при хране-

нии затвердевшего материала могла бы быть обусловлена процессами, протекавшими не в бетоне, а на поверхности стальных пластин, потенциал которых мог изменяться со временем и влиять на спектр импеданса. Указанная специфика электрохимической импедансной спектроскопии учтена в данной работе, целью которой было выяснение действительной возможности мониторинга свойств именно затвердевшего цементобетона методом электрохимической импедансной спектроскопии, с использованием стальных электродов, внедряемых в стандартные образцы для испытаний (цементобетонное покрытие) на стадии, предшествующей затвердеванию.

Изготовленные образцы из цементобетона в виде стандартных для проведения прочностных характеристик балочек использовались для электрохимических измерений (после установки электродов) и готовились по следующей методике. Для изготовления образцов-балочек в качестве исходных компонентов (согласно ГОСТ 310.4) использовали портландцемент и нормальный фракционированный кварцевый песок в соотношении Ц:П = 1:3. Портландцемент, который применяли в качестве вяжущего, был марки М500 (ГОСТ 10178–85), не содержал комков (для чего цемент предварительно просеивали через сито) и химических добавок, имел нормальную плотность цементного теста (27 %) и период схватывания (около 60 мин). В состав цементного вяжущего добавляли мелкий минеральный заполнитель, представляющий собой стандартный полифракционный кварцевый песок с размерами зерен от 0,63 до 2,50 мм. Водоцементное соотношение подбирали таким образом, чтобы расплыв конуса, определяемый на специальном приборе, не превышал 106 мм. Вода, используемая для затворения, соответствовала требованиям ГОСТ 51232 и имела температуру 25 °С. После приготовления и перемешивания до требуемой консистенции водоцементный раствор укладывали в форму для изготовления стандартных балочек и в течение 3 мин смесь уплотняли в этой форме на специальной виброплощадке.

С целью контроля влияния возможных различий потенциалов электродов на частотные характеристики отклика образцов цементобетона на переменном токе, а также исследования

эффектов, связанных с различием расстояний между электродами, каждый блок снабжался четырьмя стальными электродами, которые располагались в один ряд [8]. Твердение образцов (цементного теста с минеральным заполнителем), приготовленных таким образом, происходило в ванне с гидравлическим затвором в течение 28 сут.

В измерениях, выполненных после затвердевания цементобетона, установлено, что величины разности потенциалов между разными парами электродов в образцах, в силу гетерогенности системы и неоднородности ее состава, имеют различия порядка нескольких десятков милливольт. Вольт-амперные характеристики бетона (цементного камня), полученного на основе портландцемента (цемента) и мелкого минерального заполнителя (гранитный отсев с размерами частиц от 0,63 до 2,50 мм) при разных скоростях сканирования напряжения между измерительными электродами (зависимости тока от напряжения получены с использованием потенциостата Gamry G300 в режиме двухэлектродной поляризации), представлены на рис. 2.

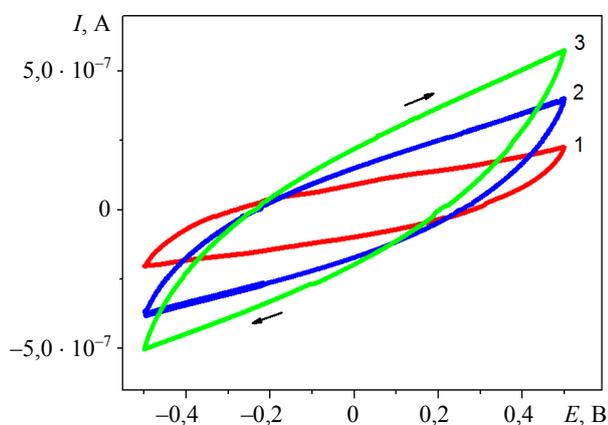


Рис. 2. Циклические вольт-амперные характеристики бетона, содержащего частицы гранитного отсева, при разных скоростях сканирования напряжения между измерительными электродами:
1 – 5 мВ/с; 2 – 20 мВ/с; 3 – 50 мВ/с

Fig. 2. Cyclic voltammograms of concrete containing granite chippings particles at different voltage scan rates:
1 – 5 mV/s; 2 – 20 mV/s; 3 – 50 mV/s

Как видно из рис. 2, для тока характерен гистерезис, величина которого определяется скоростью изменения напряжения. Повышение скорости изменения напряжения приводит к увеличению крутизны вольт-амперной зависимости, что соответствует уменьшению эф-

фективной величины сопротивления. Такое поведение бывает характерно для электрических цепей с электрохимическими элементами, в которых перенос заряда обеспечивается не только переносом электронов в цепи, но и перемещением более тяжелых электроактивных частиц (ионов, ионно-молекулярных ассоциатов). Поэтому для получения более полной информации из отклика объекта на изменение величины напряжения использовали метод электрохимической импедансной спектроскопии. Комплексную величину импеданса в интервале частот переменного тока от 10^{-3} до 50000 Гц измеряли потенциостатом G300 с использованием программы электрохимической импедансной спектроскопии Gamry EIS300. Измерения проводили на переменном токе амплитудой 10 мВ при дополнительном постоянном напряжении 100 мВ и в его отсутствии. Использование зондирующего переменноточкового сигнала малой амплитуды было необходимо в связи с нелинейностью вольт-амперной характеристики, а дополнительное постоянное напряжение использовалось для получения информации о возможной роли отклика междуфазной границы между электродами и цементом в формировании спектра импеданса. Дело в том, что мнимая и действительная части импеданса пограничного слоя между металлом и проводником с ионным типом проводимости могут сильно зависеть от величины потенциала металлического электрода (это находит применение в исследовании процессов на междуфазных границах [15–17]). Поскольку значения электродных потенциалов, как показали измерения, имели разброс порядка 10 мВ, тестовая величина дополнительного постоянного напряжения 100 мВ моделировала максимальный эффект собственных различий потенциалов измерительных электродов. Использование постоянного смещающего напряжения, сопоставимого по величине с максимальной величиной различий потенциалов измерительных электродов в условиях разомкнутой цепи, позволило выяснить, что вносит основной вклад в спектр импеданса – бетон или его граница с металлическим электродом.

Типичные зависимости модуля импеданса от частоты для образцов бетона с заполнителем из отсева гранита, а также спектры импеданса тех же объектов в координатах Найквиста

(зависимость мнимой части импеданса от его действительной части) представлены на рис. 3.

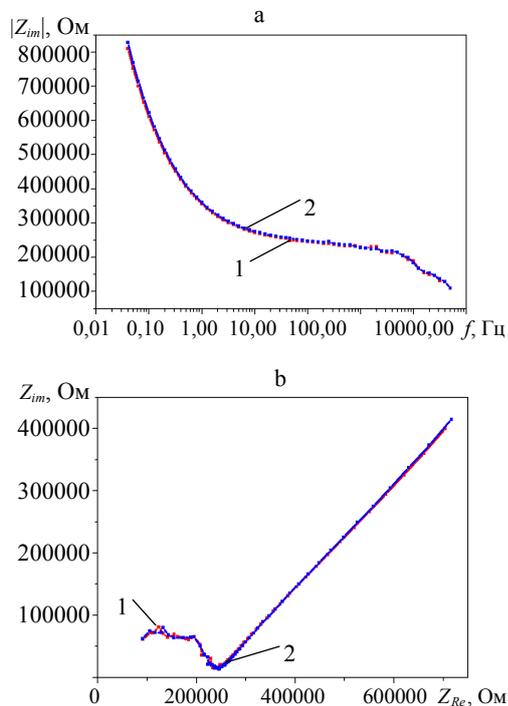


Рис. 3. Типичные зависимости модуля импеданса от частоты переменного тока (а) и мнимого импеданса от действительного импеданса (б) при отсутствии и наличии постоянного напряжения между измерительными электродами: 1 – 0; 2 – 0,1 В

Fig. 3. Typical dependencies of impedance module on ac frequency (a) and imaginary impedance on real impedance (b) in absence and presence of voltage applied to measuring electrodes: 1 – 0; 2 – 0,1 V

Как видно из рис. 3, смещающее напряжение практически не влияет на вид спектра импеданса, что указывает на бетон как основной источник исследуемого отклика и практически снимает проблему разброса значений потенциала измерительного электрода в исследовании бетона методом электрохимической импедансной спектроскопии. Модуль импеданса сильно увеличивается с уменьшением частоты, что указывает на участие в переносе заряда в бетоне совокупности процессов, протекающих с разной скоростью. Из диаграммы Найквиста видно, что в области малых значений импеданса (на высоких частотах) проявляется участок искаженного (из-за высокого уровня шума в этой области спектра) полукруга – типичный отклик параллельно соединенных емкостей и активного сопротивления, а на низких частотах

такие большие значения импеданса характеризуются линейной зависимостью мнимой части импеданса от его действительной части. Линейная зависимость указанного типа обычно порождается диффузией электроактивных частиц [17], однако диффузионный импеданс (импеданс элемента Варбурга в эквивалентных электрических схемах) характеризуется равными вкладами в мнимую и действительную части, а в данном случае вклады хотя и пропорциональные, но не равные. Такой характер диффузионного импеданса указывает на участие в переносе заряда параллельно с диффузией процесса, характеризующегося сдвигом фаз, не изменяющимся с изменением частоты. В эквивалентной электрической схеме данный процесс представляется элементом постоянной фазы. Увеличение расстояния между электродами, как и следовало ожидать, приводило к повышению импеданса, однако значение импеданса не было пропорционально расстоянию, что, видимо, обусловлено неоднородностью цементобетона и большой ролью электропереноса по системе пор, обеспечивающих диффузию ионов.

Типичные спектры импеданса (в координатах зависимости мнимой части от действительной), полученные при твердении образца цементобетона в атмосфере насыщенных водяных паров, представлены на рис. 4, где можно проследить общую тенденцию изменения спектра со временем. При твердении происходит ожидаемое увеличение как действительной, так и мнимой частей импеданса, что связано с закупориванием каналов, обеспечивающих передвижение раствора внутри материала. Вероятно, основной вклад в электропроводность материала вносит именно проводимость внутреннего раствора, а не твердофазная ионная проводимость. Исследование высушенных в течение длительного времени образцов материалов показало, что их импеданс во много раз превышает импеданс образцов, находящихся в процессе твердения или контактирующих с водой.

По прошествии определенного времени, необходимого для отверждения цементобетона, образцы помещали в сухую атмосферу и измеряли спектры импеданса в процессе высыхания (рис. 4). При этом наблюдалось более быстрое увеличение обеих составляющих импеданса

со временем, что связано с удалением раствора из внутренних пор. При увеличении импеданса до значений более 100 кОм существенно возростала погрешность спектров и возникала техническая трудность измерения импеданса на малых частотах. Поэтому представленные на рис. 4 результаты ограничены спектром, полученным после высушивания образца в течение 35 дней.

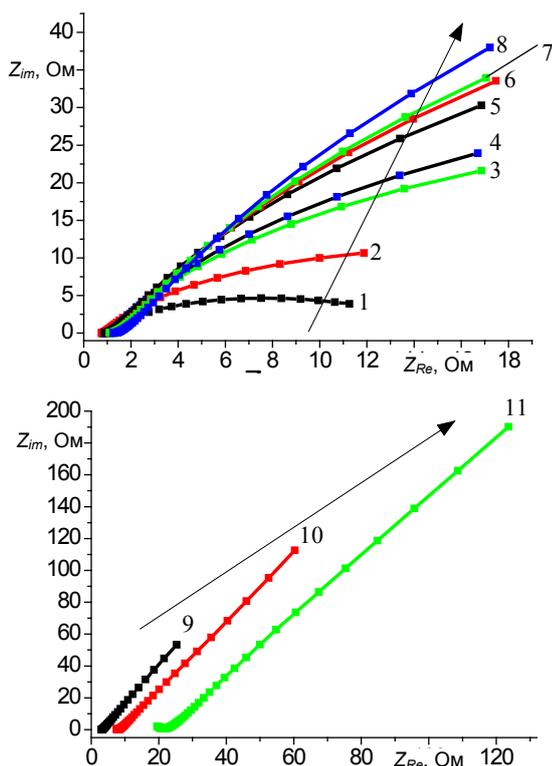


Рис. 4. Тенденция изменения спектра импеданса цементобетонного материала при затвердевании во влажной атмосфере. Численные обозначения графиков соответствуют количеству дней, прошедших после приготовления материала. Стрелка указывает тенденцию в изменении спектра: 1 – 1; 2 – 3; 3 – 7; 4 – 9; 5 – 14; 6 – 16; 7 – 19; 8 – 27; 9 – 4; 10 – 15; 11 – 35

Fig. 4. Tendency of cement-concrete material impedance spectrum change during solidification process in humid atmosphere. Numerical assignments correspond to time (days) passed after material preparation. Arrow indicates the tendency of spectra change: 1 – 1; 2 – 3; 3 – 7; 4 – 9; 5 – 14; 6 – 16; 7 – 19; 8 – 27; 9 – 4; 10 – 15; 11 – 35

С целью количественной характеристики процесса твердения цементобетона и детального рассмотрения механизма твердения установлена эквивалентная электрическая схема (рис. 5), характеризующая перенос заряда в материале.

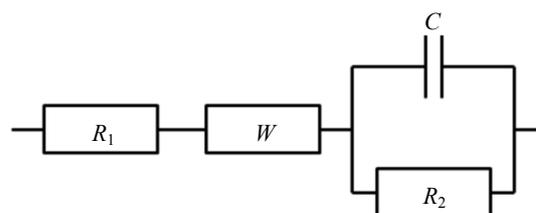


Рис. 5. Эквивалентная схема, установленная при анализе спектров импеданса, характеризующая перенос заряда в объеме материала: R_1, R_2 – элементы сопротивления (резисторы); C – элемент емкости (конденсатор); W – элемент диффузионного импеданса (не имеет аналога в физической электрической схеме)
Fig. 5. Equivalent circuit estimated in analysis of impedance spectra characterizing charge transfer in material: R_1, R_2 – resistance elements; C – capacity element; W – diffusion impedance element (has no analog in physical electrical circuit)

Метод эквивалентных электрических схем широко используется для анализа спектров импеданса. Он заключается в установлении эквивалентной электрической схемы, которая должна соответствовать предполагаемому механизму переноса заряда, а ее рассчитываемый спектр должен максимально соответствовать экспериментально полученному спектру исследуемой системы. Исходя из предложенной эквивалентной схемы процесс переноса заряда включает следующие стадии. Переносу заряда через электропроводящие слои соответствует элемент сопротивления R_1 . Переносу заряда за счет диффузии заряженных частиц в объеме материала соответствует специфический элемент диффузионного импеданса, не имеющий аналога в физических электрических схемах. Диффузионный импеданс характеризуется константой Варбурга (A_w). Чем меньше скорость переноса заряда за счет диффузии, тем больше значение A_w . Блок из параллельно соединенных резистора R_2 и конденсатора C соответствует переносу заряда, сопровождающемуся осцилляцией объемного заряда при прохождении переменного тока, например при адсорбции заряженных частиц на поверхности твердой электропроводящей фазы.

Расчет параметров эквивалентной электрической схемы проводили с использованием программы EIS Spectrum Analyser. Полученные зависимости параметров от времени в процессе твердения цементобетонного материала и последующего выдерживания его на воздухе представлены на рис. 6.

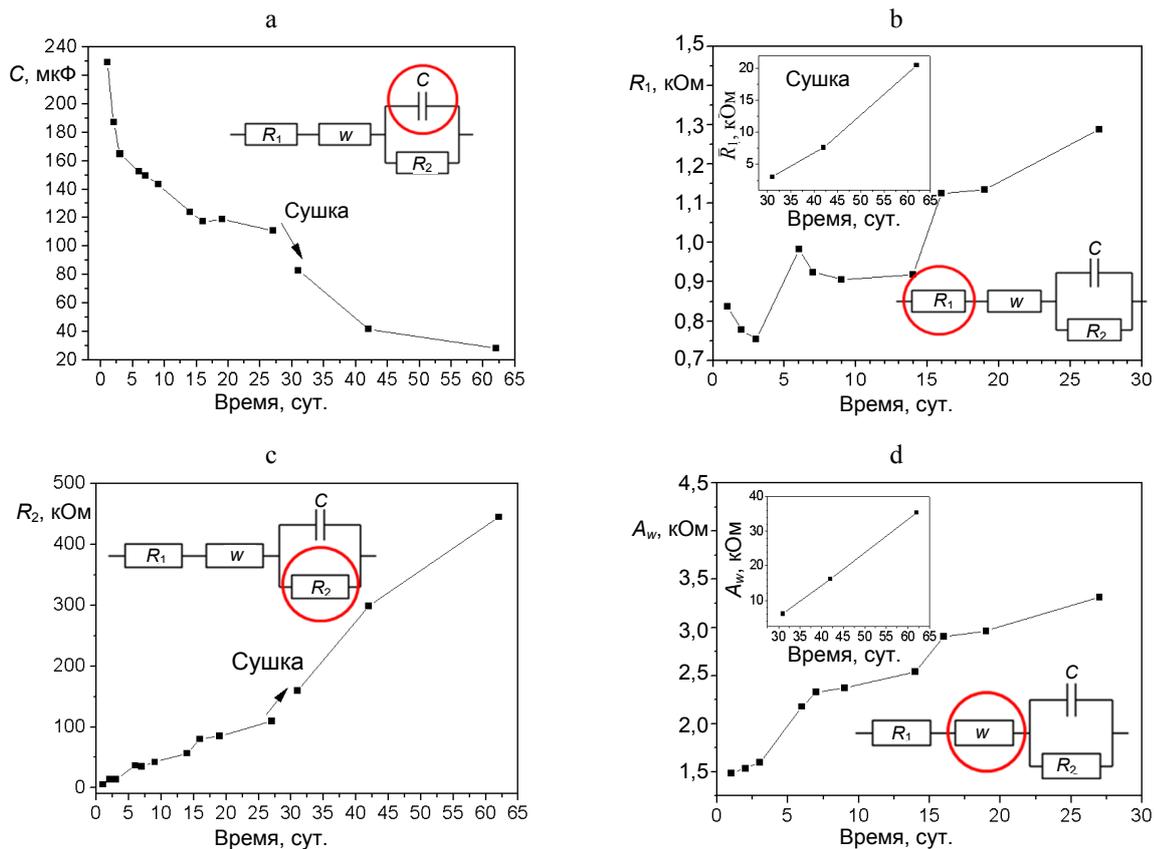


Рис. 6. Зависимость параметров цементобетонного материала, соответствующих эквивалентной электрической схеме, от времени при отверждении и последующем высушивании: а – емкость C ; б – сопротивление R_1 ; с – сопротивление R_2 ; д – константа диффузионного импеданса (константа Варбурга) A_w .

На графиках б и д данные, соответствующие высушиванию, представлены на врезке в связи с большим отличием значений от данных основного графика

Fig. 6. Dependencies of parameters of cement-concrete materials corresponding to the equivalent circuit: а – capacity; б – resistance R_1 ; с – resistance R_2 ; д – diffusion impedance constant (Warburg constant) A_w .

In figures b and d data corresponding to drying are represented in inset due to big difference of its values compared to main figure

На графиках наблюдается согласованное изменение значений всех параметров в процессе твердения бетона. В связи со связыванием частиц и закупориванием каналов, содержащих раствор, происходит уменьшение емкости (рис. 6а), увеличение сопротивления переноса заряда (рис. 6б, с) и замедление диффузии (рис. 6д). При удалении материала из атмосферы насыщенных водяных паров ускоряются отмеченные изменения. При этом на зависимостях сопротивления переноса заряда и диффузионного импеданса наблюдается особенно быстрый рост со скоростью, почти не меняющейся со временем (рис. 6б, д – врезки).

Аналогичный вид зависимостей отмечен при исследовании всех типов рассмотренных материалов. Замечено, что кратковременное

пребывание материала во влажной среде оказывает существенное влияние на значения параметров переноса заряда. Указанное изменение оказалось намного больше различий, связанных с влиянием природы заполнителя и гранулометрического состава. Тем не менее предложенная методика позволяет проводить количественную оценку изменений, происходящих в процессе твердения и коррозии бетона.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа зависимости сопротивления (импеданса) от частоты переменного тока и сравнения спектров импеданса, полученных для образцов цементобетона с минеральными порошковыми заполнителями раз-

личной природы и гранулометрического состава, выявлены тенденции изменения параметров спектра при твердении и последующем контакте с влагой для образцов каждого типа. Комплексную величину импеданса измеряли с использованием потенциостата Gamry G300, а анализ спектров и расчет параметров эквивалентной схемы проводили с помощью программы EIS Spectrum Analyzer.

2. Предложена эквивалентная электрическая схема, позволяющая характеризовать закономерности и особенности физико-химических процессов, сопровождающихся переносом заряда в цементобетонном конгломерате.

3. Показана принципиальная возможность использования импедансной спектроскопии для решения некоторых актуальных задач в области технологии цементобетона, в частности для обоснования возможности применения некоторых видов техногенных отходов (например, отсеков горнодобывающей промышленности) в качестве мелкого заполнителя, а также возможность оптимизации минералогического и гранулометрического составов заполнителя для цементобетонной смеси в дорожном строительстве. Развитие подхода к исследованию свойств цементобетонных материалов на основе анализа спектров импеданса дает возможность сравнения характеристик процессов твердения и коррозии, протекающих в эталонных образцах и образцах исследуемых составов.

4. На основании проведенных исследований показано, что метод электрохимической импедансной спектроскопии позволяет определять совместное влияние на прохождение переменного тока через исследуемые образцы цементобетона ряда процессов, характеризующихся разными частотными зависимостями импеданса. Развитие подхода к исследованию свойств цементобетонных материалов на основе анализа частотных зависимостей их импеданса позволит количественно характеризовать протекающие в них процессы, в частности, обуславливающие твердение и коррозию бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев, М. М. Твердение вяжущих веществ / М. М. Сычев. – Л.: Стройиздат (Ленинградское отд-е), 1987. – 80 с.

2. Ковалев, Я. Н. Физико-химические основы технологии строительных материалов / Я. Н. Ковалев. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2012. – 285 с.

3. Сычев, М. М. Твердение цементов / М. М. Сычев. – Л.: ЛТИ, 1981. – 65 с.

4. Сычев, М. М. Современные представления о механизме гидратации цементов / М. М. Сычев. – М.: ВНИИЭСМ, 1984 – 51 с. – (Обзорная информация. Сер. I: Цементная промышленность. Вып. 3.)

5. Розенталь, О. М. Радиочастотная диэлькометрия цементных паст. Использование результатов для микроструктурного анализа / О. М. Розенталь, Е. И. Федингин, И. Ф. Ефремов // Коллоидный журнал – 1978. – № 5. – С. 891–897.

6. Жуковский, В. М. Импедансная спектроскопия твердых электролитических материалов: метод. пособие / В. М. Жуковский, О. В. Бушкова. – Екатеринбург: Уральский гос. ун-т, 2000. – 35 с.

7. Ragoisha, G. A. Potentiodynamic Electrochemical Impedance Spectroscopy for Solid State Chemistry / G. A. Ragoisha, A. S. Bondarenko // Solid State Phenomena. – 2003. – Vol. 90–91. – P. 103–108.

8. Разработка электрохимических методов мониторинга процессов твердения и коррозии в цементобетонных материалах / С. Н. Бондаренко [и др.] // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24–25 сент. 2014 г. – Минск: НПО «Центр», 2014. – С. 114.

9. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин [и др.]. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.

10. Coupling Between Leaching and Creep of Concrete / J. M. Torrentia [et al.] // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38 (6). – P. 816–821.

11. Song, H. W. Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures / H. W. Song, V. Saraswathy // Int. J. Electrochem. Science. – 2007. – Vol. 2 (1). – P. 1–28.

12. Impedance Spectroscopy of Hydrating Cement-Based Materials: Measurement, Interpretation and Application / B. J. Christensen [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. – 1994. – 77 (11). – P. 2789–2804.

13. Impedance Measurements on Cement Paste / M. Keddam [et al.] // Cement and Concrete Research. – 1997. – Vol. 27. – P. 1191–1201.

14. Comparative Study of an Experimental Portland Cement and ProRoot MTA by Electrochemical Impedance Spectroscopy / K. P. Seong [et al.] // Ceramics International. – 2014. – Vol. 40 (1). – P. 1741–1746.

15. Ragoisha, G. A. Potentiodynamic Electrochemical Impedance Spectroscopy / G. A. Ragoisha // Electrochemical Dictionary / G. A. Ragoisha. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 991 p.

16. Ragoisha, G. A. Potentiodynamic Electrochemical Impedance Spectroscopy / G. A. Ragoisha, A. S. Bondarenko // Electrochimica Acta. – 2005. – Vol. 50 (7–8). – P. 1553–1563.

17. Barsoukov, E. Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment and Applications / E. Barsoukov, J. R. Macdonald. – 2nd Edition. – N.Y.: Wiley, 2005. – 616 p.

Поступила 29.09.2015

REFERENCES

1. Sychev, M. M. (1987) *Binding Agents Solidification*. Lenibgrad, Stroyizdat (Leningradskoe Otdelenie). 80 p. (in Russian).
2. Kovalev, Ia. N. (2012) *Physico-Chemical Basis of Technology of Building Materials*. Minsk, Novoe Znanie; Moscow, INFRA-M. 285 p. (in Russian).
3. Sychev, M. M. (1981) *Hardening of Cements*. Leningrad, LTI. 65 p. (in Russian).
4. Sychev, M. M. (1984) An Overview of Modern Views on the Mechanism of Hydration of Cement. Moscow, VNIIESM. 51 p. (in Russian).
5. Rozental, O. M., Fedingin, E. I., & Efremov, I. F. (1978) Radio-Frequency Dielectric Spectroscopy of Cement Pastes. Use of Results for Microstructural Analysis. *Kolloidnyi Zhurnal* [Colloid Journal], 5, 891–897 (in Russian).
6. Zhukovskiy, V. M., & Bushkova O. V. (2000) *Impedance Spectroscopy of Solid Electrolytic Materials*. Ekaterinburg: Ural State University. 35 p. (in Russian).
7. Ragoisha, G. A., & Bondarenko, A. S. (2003) Potentiodynamic Electrochemical Impedance Spectroscopy for Solid State Chemistry. *Solid State Phenomena*, 90–91, 103–108. Doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.90-91.103.
8. Bondarenko, S. N., Ragoisha, G. A., & Chulkin, P. V. (2014) Development of Electrochemical Methods for Monitoring of Processes of Hardening and Corrosion in Cement Concrete Materials. *Materials of 5th International Scientific-Technical Conference "Processing of Mineral Raw Materials. Innovative Technologies and Equipment"*. Minsk, NPO Tsentr, 114 p. (in Russian).
9. Moskvina, V. M., Ivanov, F. M., Alekseev, S. N., & Guzeev, E. A. (1980) *Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Methods of their Protection*. Moscow, Stroyizdat. 536 p. (in Russian).
10. Torrenti, J. M., Nguyen, V. H., Colina, H., Le Maou, F., Benboudjema, F., & Deleruyelle, F. (2008) Coupling Between Leaching and Creep of Concrete. *Cement and Concrete Research*, 38 (6), 816–821. Doi:10.1016/j.cemconres.2008.01.012.
11. Song, H. W., & Saraswathy, V. (2007) Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures. *International Journal of Electrochemical Science*, 2 (1), 1–28.
12. Christensen, B. J., Coverdale, R. T., Olson, R. A., Ford, S. J., Garboczi, E. J., Jennings, H. M., Mason, T. O. (1994) Impedance Spectroscopy of Hydrating Cement-Based Materials: Measurement, Interpretation and Application. *Journal of the American Ceramic Society*, 77 (11), 2789–2804. Doi: 10.1111/j.1151-2916.1994.tb04507.x.
13. Keddad, M., Takenouti, H., Novoa, X. R., Andrade, C., & Alonso, C. (1997) Impedance Measurements on Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, 27, 1191–1201. Doi: 10.1016/S0008-8846(97)00117-8.
14. Seong, K. P., Jeon, S. Y., Singh, B., Hwang, J. H., & Song, S. J. (2014) Comparative Study of an Experimental Portland Cement and ProRoot MTA by Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Ceramics International*, 40 (1), 1741–1746. Doi: 10.1016/j.ceramint.2013.07.073.
15. Ragoisha, G. A. (2008) Potentiodynamic Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Electrochemical Dictionary*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag. Doi:10.1007/978-3-540-74598-3.
16. Ragoisha, G. A., & Bondarenko, A. S. (2005) Potentiodynamic Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Electrochimica Acta*, 50 (7–8), 1553–1563. Doi:10.1016/j.electacta.2004.10.055.
17. Barsoukov, E., & Macdonald, J. R. (2005) *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment and Applications*. 2nd Edition. N.Y.: Wiley. 616 p.

Received 29.09.2015

ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОДОРОЖНОГО КОМПЛЕКСА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

*Инж. СОЛОДКАЯ М. Г.¹⁾, докт. экон. наук, проф. ТУР А. Н.¹⁾,
докт. техн. наук, проф. КОВАЛЕВ Я. Н.¹⁾*

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

E-mail: solodkaya@gmail.com

Автодорожный комплекс объективно отражает сущность эффективного перевозочного процесса, осуществляемого транспортными средствами по автомобильным дорогам. Он подчеркивает равнозначность вклада транспортных средств и дорог в единый перевозочный процесс. Эффективное функционирование экономики государства жестко зависит от наличия развитой и надежно работающей сети автомобильных дорог. Страны с развитой экономикой, которые в основном завершили создание национальной сети дорог, продолжают вкладывать средства в дорожное хозяйство, что стимулирует развитие отраслей промышленности, сельского хозяйства, торговли и др. Их развитие и эффективное функционирование возможны лишь при сбалансированном развитии автодорожного комплекса страны, автомобильного транспорта и дорожной инфраструктуры. Взаимодействие этих компонентов единой экономической системы определяется техническими характеристиками автомобильного транспорта и транспортно-эксплуатационными показателями автомобильных дорог. В условиях формирования рыночных механизмов хозяйствования развитие методов оптимальной организации управления функционированием автодорожного комплекса является важной задачей народного хозяйства страны. Для обеспечения состояния дорог, отвечающего требованиям как современного, так и перспективного автомобильного движения, потребуются дальнейший рост капиталовложений, включая инвестиции. Управление состоянием сети автомобильных дорог сводится к определению такого набора регулирующих воздействий на дорожные условия, которые позволят минимизировать издержки в автотранспортном комплексе. Таким регулирующим воздействием служат выработка и реализация наиболее эффективных ремонтных мероприятий. Цель достигается путем решения задачи обеспечения минимизации затрат на перевозки в автотранспортном комплексе при реализации наиболее эффективных ремонтных мероприятий на этапе жизненного цикла автомобильной дороги.

Ключевые слова: автодорожный комплекс, транспортные средства, эффективность ремонтных мероприятий, управление.

Библиогр.: 14 назв.

SPECIFIC FEATURES OF HIGHER EFFICIENCY IN FUNCTIONING OF ROAD-TRANSPORT COMPLEX IN THE REPUBLIC OF BELARUS

SOLODKAYA M. G.¹⁾, TUR A. N.¹⁾, KOVALEV Ya. N.¹⁾

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

The road-transport complex objectively reflects the essence of efficient transportation process which is carried out by transport facilities along the highways. The complex emphasizes an equivalent contribution of transport facilities and highways in a unified transportation process. Efficiency of the state economy rigidly depends on availability of the developed and well-functioning network of highways. Countries with the developed economy which have generally finished creation of national highway networks continue to invest money in public road systems that stimulates development of industrial sectors, agriculture and trade, etc. Their progress and efficient functioning is possible only with the balanced, overall development of the road-transport complex of the country. Functioning of the road-transport complex is inextricable connected with the operation of automotive transport and road infrastructure. Interaction of these two components of the unified economic system is determined by technical characteristics of the automotive transport and transport and operational indices of the highways. Development of methods for optimum organization of management for functioning of the road complex is considered as an important problem of the national economy while forming market economy mechanisms. Further growth of capital expenditures including investments will be needed in order to ensure such road conditions that meet the requirements of modern and perspective road traffic. Management of the highway network conditions presupposes a selection of such set of regulatory impacts on road conditions which will allow to minimize expenses in the road-transport complex. Elaboration and realization of the most efficient repair measures serve as such regulatory impact. The purpose is achieved while solving the problem pertaining to minimization of expenses on transportations in the road-transport complex in the process of the realization of the most efficient repair measures at the stage of highway life cycle.

Keywords: road-transport complex, transport facilities, efficiency of repair measures, management.

Ref.: 14 titles.

Автомобильный комплекс (АДК) – сложная технико-экономическая система, включающая транспортные средства (автомобильный транспорт) и коммуникации (автомобильные дороги), объединенные единой целью – постоянно осуществлять безопасные перевозки грузов и людей с максимальной эффективностью. Термин «АДК» [1] более объективно отражает сущность эффективного перевозочного процесса, осуществляемого транспортными средствами по автомобильным дорогам. Он подчеркивает равнозначность вклада транспортных средств и дорог в единый перевозочный процесс. Проблема эффективности функционирования АДК имеет не только терминологический смысл, она затрагивает вопросы повышения эффективности работы автомобильного хозяйства в целом.

Актуальность темы состоит в необходимости устранения существующей негативной тенденции: перевозчики постоянно требуют хороших дорог (они позиционируют себя «главными» в этом процессе), хотя объективно они же и разрушают их с нарастающей интенсивностью (например, увеличение осевых нагрузок до 13–14 т), не внося почти никакой компенсации на ремонт и содержание дорожной сети. Однозначно утверждается, что даже незначительная перегрузка не проходит без последствий для состояния дорожной сети, а большая перегрузка представляет серьезную опасность для потребительских качеств покрытия, способствуя его ускоренному разрушению и снижению безопасности. Поэтому в разных странах применяются различные методы предотвращения нанесения ущерба автомобильным дорогам автотранспортом с высокой нагрузкой на ось. Среди них можно выделить основные: взимание сборов, ограничение скорости движения грузовых транспортных средств, запрет на движение тяжеловесных крупногабаритных транспортных средств, введение сезонных весенних и летних ограничений движения.

Такая ситуация непосредственно сказывается на финансировании дорожных работ. Действительно, в настоящее время автомобильные перевозки финансируются на основе хозрасчета, а затраты дорожников – из государственного бюджета (которого, как правило, не хватает). Здесь ощущается явный экономический дисбаланс, хотя давно стало очевидным: кто едет по

дорогам – тот и платит. На этом принципе, кстати, основаны все системы оказания перевозочных услуг на всех существующих видах транспорта.

Экономическая эффективность функционирования АДК в макроэкономическом смысле определяется величиной необходимых затрат и той прибыли, которую получают субъекты хозяйствования транспортников и дорожников. Соответственно процесс снижения затрат при эффективном функционировании АДК составляет основу оптимальной эффективной работы данного комплекса в целом [2, 3].

Таким образом, поскольку обобществленной продукцией АДК является оптимальный автоперевозочный процесс (грузо- и пассажироперевозки), прослеживается необходимость решать проблему повышения его эффективности путем рационального совместного использования основных фондов, пока принадлежащих отдельно транспортным средствам и автомобильным дорогам. Эффективное функционирование экономики государства жестко зависит от наличия развитой и надежно функционирующей сети автомобильных дорог. Чем больше плотность и выше качество сети автомобильных дорог, тем богаче страна. Дорожное хозяйство нуждается в соответствующем финансировании, и вопрос сводится к тому, какую долю ВВП общество может для этого выделить. Страны с развитой экономикой, которые в основном завершили создание национальной сети дорог, продолжают вкладывать средства в дорожное хозяйство, что стимулирует развитие отраслей промышленности, сельского хозяйства, торговли и др. Каждое рабочее место в дорожной отрасли дает возможность организовать до 20 рабочих мест в смежных отраслях. Вложенные государственные средства в дорожное хозяйство значительно увеличивают поступления в бюджет страны и дают возможность заработать сотням тысяч граждан [4].

Развитие и эффективное функционирование промышленного производства, строительства, торговли, сферы услуг, сельского хозяйства возможны лишь при сбалансированном, комплексном развитии АДК страны. Основная цель – доставка продукции различных отраслей промышленного производства, сырья и полуфабрикатов, а также удовлетворение потребности населения в пространственном перемещении. Результатом деятельности АДК явля-

ется услуга, в результате которой меняется пространственное положение товара. В промышленном производстве, торговле, сфере услуг при перемещении увеличивается стоимость перевозимого груза, так как осуществление транспортирования сопряжено с затратами материально-технических ресурсов, включая улучшение транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог.

Функционирование АДК неразрывно сопряжено с деятельностью автомобильного транспорта и дорожной инфраструктуры. Взаимодействие этих двух компонентов единой экономической системы определяется техническими характеристиками автомобильного транспорта и транспортно-эксплуатационными показателями автомобильных дорог. От технического уровня и эксплуатационного состояния автомобильной дороги существенно зависят скорость транспортных потоков, пропускная способность, безопасность движения и экология придорожного пространства. С увеличением технической скорости возрастает производительность автомобильного транспорта при неизменной сумме постоянных расходов, что позволяет снизить себестоимость автомобильных перевозок, приходящихся на 1 т/км.

В условиях формирования рыночных механизмов хозяйствования развитие методов оптимальной организации управления функционированием АДК является важной задачей народного хозяйства страны. В последние годы усилия направлены на выработку оптимальной организации и управления эксплуатацией автомобильными дорогами, что связано с рядом объективных и субъективных причин. К субъективным можно отнести причины, связанные с необходимостью сохранения существующей сети автомобильных дорог в условиях катастрофической нехватки финансовых ресурсов, к объективным – возрастание внимания к вопросам содержания автомобильных дорог. По мере формирования дорожной сети во всех развитых и развивающихся странах мира большое значение приобретают аспекты ремонта и содержания автомобильных дорог, т. е. поддержание и доведение транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог до требований, удовлетворяющих потребности пользователей в удобном, беспрепятственном, безопасном и экономичном передви-

жении с нормативными скоростями и нагрузками [2, 5].

Потребительские свойства автомобильных дорог находятся в прямой зависимости от их транспортно-эксплуатационного состояния, которое характеризуется показателями технического уровня и эксплуатационного состояния автомобильной дороги. Основываясь на этом, выполнение исследований по совершенствованию, развитию и внедрению интенсивных ресурсосберегающих технологий управления состоянием покрытия автомобильных дорог приводит к необходимости решения комплекса взаимосвязанных проблем. С позиций системного анализа в рассмотрении АДК структурная схема оптимального управления состоянием транспортно-экономических показателей (ТЭП) состоит из ряда взаимосвязанных задач:

- социальной потребности в АДК;
- финансово-экономических возможностей создания АДК;
- управления состоянием АДК (экономико-статистические модели управления);
- соотношения получаемого результата с поставленными задачами.

Для обеспечения состояния дорог, отвечающего требованиям как современного, так и перспективного автомобильного движения, потребуется дальнейший рост капиталовложений, включая инвестиции. Рациональное научно обоснованное их расходование представляет важную народно-хозяйственную задачу.

Практическая реализация состоит в выработке методов и научной обоснованности показателей оценки, составляющих основу комплексного подхода к выбору ремонтной стратегии, позволяющей прогнозировать потенциально возможные изменения ТЭП дороги на различных этапах службы в конкретных для рассматриваемой автомобильной дороги изменяющихся условиях эксплуатации, а следовательно, принимать адекватные управленческие решения. Это даст возможность расширить совершенствование управления дорожно-ремонтным комплексом на стадии планирования дорожных работ при обосновании потребности необходимых средств и распределении их во времени для оценки выработанных технических решений по назначению видов дорожных работ с позиций экономической обоснованности [6, 7].

На данный момент нет законодательно утвержденного нормативного документа, позволяющего рассчитать экономическую эффективность отраслей народного хозяйства в зависимости от развития сети автомобильных дорог и выполнения дорожных работ.

В условиях ограниченных ресурсов на ремонт сети автомобильных дорог планирование этих работ существенно усложняется, а ответственность за принимаемые решения возрастает. Поэтому постановка задачи о приведении транспортно-эксплуатационного состояния одновременно всей дорожной сети в соответствие с нормативными требованиями невозможна. В результате этого выработка методики планирования ремонтных работ заключается в том, чтобы обосновать наиболее рациональный набор дорог, участков и видов работ и получить максимальный экономический эффект у пользователей. В данном случае необходимо исправить в первую очередь те параметры или участки дорог, которые способствуют наибольшему снижению транспортных издержек, не допуская значительных дополнительных затрат из-за невыполнения или недоремонта автомобильных дорог [8].

Объективная оценка эффективности проведения ремонтных мероприятий связана с оценкой комплекса технических и экономических показателей, отражающих требуемые нормативы по обеспечению: скорости и безопасности движения по дороге, прочности дорожного покрытия и искусственных сооружений, оптимальной себестоимости перевозок, обоснованных затрат на ремонт и содержание дорог.

Количественная оценка необходимых затрат на воспроизводство автомобильной дороги объективно определяет потребность в финансовых и материально-технических ресурсах. На основе этого выполняется количественный анализ эффективности затрат на воспроизводство автомобильной дороги как объекта хозяйственной деятельности. Управление состоянием сети автомобильных дорог сводится к определению набора регулирующих воздействий на дорожные условия, которые позволят минимизировать издержки в автотранспортном комплексе. Таким регулирующим воздействием служат выработка и реализация наиболее эффективных ремонтных мероприятий. Цель достигается путем решения задачи обеспечения минимизации затрат на перевозки в автотран-

портном комплексе при реализации наиболее эффективных ремонтных мероприятий на этапе жизненного цикла автомобильной дороги.

Полученный результат позволяет с максимальной эффективностью распределить имеющиеся ограниченные материально-технические ресурсы. Экономическая составляющая воздействия представляет собой функциональную оценку финансового эффекта от реализации принятого плана ремонта, сделанного на основе метода статистического моделирования функционирования автомобильной дороги. Финансовый эффект отклика есть сумма получаемых выгод в нетранспортной и транспортной сферах [5, 11, 12].

Экономический эффект в нетранспортной сфере связан с тем, что время транспортировки грузов органически связано с временем оборачиваемости средств. Скорость транспортировки, выступая как итоговая величина от технической скорости перемещения транспортных средств и организации движения товарных масс (объектов транспортировки), оказывает прямое влияние на абсолютную и относительную скорость оборачиваемости средств промышленных предприятий и торговых организаций. Повышение скорости оборота ведет к ускорению процесса расширенного воспроизводства.

Транспортный экономический эффект достигается за счет удовлетворения спроса на перевозки грузов и пассажиров, повышения их безопасности и качества, конкурентоспособности отечественных перевозчиков на внутреннем и внешнем рынках транспортных работ и услуг, создания условий для финансового оздоровления предприятий транспорта посредством инвестиционной активности [13, 14].

ВЫВОД

Транспорт является важнейшей составной частью экономики, фактором, обеспечивающим ее единство и целостность. Развитие автодорожного комплекса во многом определяет национальную безопасность страны, решение социальных задач. Устойчивая и эффективная работа транспорта позволяет другим отраслям экономики снизить стоимость товаров и услуг, что стимулирует рост производства и потребления, а также способствует расширению международных связей, интеграции национальной экономики в мировую экономическую систему.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев, Я. Н. К вопросу об уточнении логистических терминалов / Я. Н. Ковалев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 3 т. / редкол.: Б. М. Хрусталев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2010. – Т. 3. – С. 32.

2. Ковалев, Я. Н. Повышение эффективности работы автомобильных дорог как составной части автомобильного транспорта / Я. Н. Ковалев, А. Н. Тур, М. Г. Солодка // Автомобильные дороги и мосты. – 2008. – № 2. – С. 31–34.

3. Ковалев, Я. Н. К вопросу о повышении эффективности финансирования автомобильных дорог / Я. Н. Ковалев, А. Н. Тур, М. Г. Солодка // Автомобильные дороги и мосты. – 2009. – № 1 (3). – С. 103–106.

4. Чепцов, Г. В. Автомобильные дороги – категория экономическая / Г. В. Чепцов // Строительство и недвижимость. – 2005. – № 24 (514).

5. Хеггие, И. Управление и финансирование автомобильных дорог в рыночных условиях / И. Хеггие, П. Вискерс; под ред. В. В. Сильянова; пер с англ. – М.: МАДИ (ТУ), 1984. – 174 с.

6. Некрасов, В. К. Особенности методов оценки и выбора дорожных каменных материалов: автореф. ... дис. д-ра техн. наук / В. К. Некрасов. – М.: Автотрансиздат, 1962. – 40 с.

7. Зейгер, Е. М. Экономические методы повышения эффективности дорожно-строительного производства / Е. М. Зейгер. – М.: Транспорт, 1989. – 286 с.

8. Гарманов, Е. Н. Экономическая эффективность дорожного хозяйства / Е. Н. Гарманов. – М.: Транспорт, 1984. – 173 с.

9. Теренецкий, К. С. Расчет транспортных затрат в дорожном планировании для УССР / К. С. Теренецкий // Автомобильные дороги и дорожное строительство: сб. науч. тр. КАДИ. – Киев, 1965. – Вып. 1. – С. 46–53.

10. Слободчиков, Ю. В. Обоснование оценочных показателей выбора ремонтной стратегии автомобильных дорог с дорожными одеждами нежесткого типа в изменяющихся условиях эксплуатации: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.11 / Ю. В. Слободчиков. – М., 1995. – 196 л.

11. Белый, О. В. Фундаментальные научные проблемы развития транспорта / О. В. Белый // Актуальные проблемы транспорта: сб. науч.-техн. тр. – СПб, 2002. – Т. 3. – С. 74–78.

12. Crissot, N. Experience Dutilisation du Program Calcul HDM Pour Les Etudes Economiques / N. Crissot // Revue General des Routes et des Aerodromes. – 1984. – No 614. – 509 p.

13. Haas, R. Pavement Management System / R. Haas, W. R. Hudson. – New York: McGraw-Hill, 1978. – 304 p.

14. Binswanger, H. The Policy Response of Agriculture / H. Binswanger // Proceedings of the World Bank Conference on Development Economics. – Washington: World Bank, 1989. – 164 p.

Поступила 28.08.2015

REFERENCES

1. Kovalev, Ya. N. (2010) To the Problem on Detailing Logistics Terminals. *Nauka – Obrazovaniuu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy Shestoi Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhn.*

nicheskoi Konferentsii. T. 3 [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 6th International Science and Technical Conference. Vol. 3]. Minsk: BNTU, 32 (in Russian).

2. Kovalev, Ya. N., Tur, A. N., & Solodkaya, M. G. (2008) Efficiency Improvement in Operation of Highways as an Integral Part of Automotive Transport. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty* [Highways and Bridges], 2, 31–34 (in Russian).

3. Kovalev, Ya. N., Tur, A. N., & Solodkaya, M. G. (2009) To the Problem on Efficiency Improvement in Financing of Highways. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty* [Highways and Bridges], 1 (3), 103–106 (in Russian).

4. Cheptsov, G. V. (2005) Highways – Economic Category. *Stroitelstvo i Nedvizhimost* [Construction and Real Estate], 24 (in Russian).

5. Heggie, I., & Vickers, P. (1984) Management and Financing of Roads under Market Conditions. Washington, World Bank. 184 p. (Russ. ed.: Heggie, I., Vickers, P., & (Editorship) Silyanov, V. V. (1984). *Upravlenie i Finansirovanie Avtomobilnykh Dorog v Rynochnykh Usloviakh*. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction University (Technical University). 174 p.).

6. Nekrasov V. K. (1962) *Osobennosti Metodov Otsenki i Vybora Dorozhnykh Kamennykh Materialov. Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk* [Peculiar Features in Methods for Assessment and Selection of Road Stone Materials. Abstract of Ph.D. Thesis in Engineering Science]. Moscow, Avtotransizdat. 40 p. (in Russian).

7. Zeyger E.M. (1989) *Economic Methods for Efficiency Improvement of Road Construction Production*. Moscow, Transport. 286 p. (in Russian).

8. Garmanov, E. N. (1984) *Economic Efficiency of Public Road System*. Moscow, Transport. 173 p. (in Russian).

9. Terenetsky, K. S. (1965) Calculation of Transport Expenses in Road Planning for UkSSR [Ukrainian Soviet Socialist Republic]. *Avtomobilnye Dorogi i Dorozhnoye Stroitelstvo. Sbornik Nauchnykh Trudov KADI* [Highways and Road Construction. Collection of Research Papers Kiev Automobile and Highway Institute]. Kiev, 1, 46–53 (in Russian).

10. Slobodchikov, Yu. V. (1995) *Obosnovanie Otsenochnykh Pokazatelei Vybora Remontnoi Strategii Avtomobilnykh Dorog s Dorozhnyimi Odezhdami Nezhestkogo Tipa v Izmeniaushchikhsia Usloviakh Ekspluatatsii. Dis. d-ra tekhn. nauk* [Substantiation of Estimated Figures for Selection of Repair Strategy for Highways with Road Non-Rigid Pavement Clothes in Changing Operational Conditions. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow. 196 p. (in Russian).

11. Bely, O. V. (2002) Fundamental Scientific Problems on Transport Development. *Actual Problems of Transport. Collection of Research Papers. Vol. 3*. Saint-Petersburg, 74–78 (in Russian).

12. Crissot, N. (1984) Experience Dutilisation du Program Calcul HDM Pour Les Etudes Economiques. *Revue General des Routes et des Aerodromes*, 614, 509.

13. Haas, R., & Hudson, W. R. (1978) *Pavement Management System*. New York, McGraw-Hill. 304 p.

14. Binswanger, H. (1989) The Policy Response of Agriculture. *Proceedings of the World Bank Conference on Development Economics*. – Washington, World Bank. 164 p.

Received 28.08.2015

УДК 699.82

ТЕХНОЛОГИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОРФЯНОЙ ЗОЛЫ В МАСТИКЕ ДЛЯ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ МОСТОВЫХ И ТОННЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Докт. техн. наук, проф. ЛЯХЕВИЧ Г. Д.¹⁾, канд. экон. наук, доц. ЛЯХЕВИЧ А. Г.¹⁾,
асп. АГАБАБА РАНГРАЗ АЛИРЕЗА НАДЖИБ¹⁾, студ. ДАЛИДОВСКАЯ А. А.¹⁾*

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

E-mail: lfidi@hotmail.com

Перспективным способом защиты мостов и тоннелей от агрессивного воздействия воды является обмазочная гидроизоляция на основе органоминерального вяжущего. Его структурная прочность может быть увеличена за счет введения частиц, сопоставимых с размерами асфальтенов, а эластичность дисперсионной среды – благодаря введению полимеров. Эти теоретические предпосылки указывают на возможность одновременного обеспечения гибкости при низких температурах и повышенной теплостойкости для мастик на основе органоминеральных вяжущих. В этой связи поставлена цель получить мастику с высокой гибкостью и повышенной теплостойкостью с применением высокодисперсной активированной торфяной золы. Для достижения указанной цели использовали: дробленую резину по ТУ 38.108035–87; дивинилстирольный термоэластпласт DST-30P-20ПС; битум марки 20/30 по СТБ ЕН 12591–2010; золу от сжигания торфа на Лидском торфобрикетном заводе; промышленное масло широкого назначения селективной очистки с повышенным индексом вязкости; суперпластификатор – натриевую соль продукта конденсации сульфоксидата ароматических углеводородов с формальдегидом и нейтрализации гидроокисью натрия (тип 1). С применением этих материалов разработаны составы и технология приготовления органоминеральных мастик. Испытания показали, что модификация мастик высокодисперсной торфяной золой, активированной суперпластификатором НСПКАУсФ-1, различными полимерными добавками, содействует повышению их теплостойкости, эластичности, водонепроницаемости, а также позволяет регулировать технологические и эксплуатационные свойства мастик. Экспериментально подтверждено, что торфяная зола может успешно использоваться для приготовления высококачественных гидроизоляционных мастик, так необходимых для защиты мостовых и тоннельных конструкций. Это обеспечит не только большой экономический эффект, но и будет способствовать улучшению экологической обстановки в местах сжигания торфа и захоронения золы.

Ключевые слова: мастика, зола, экспериментальные исследования, физико-механические свойства, защита, мостовые и тоннельные конструкции, экономический и экологический эффекты.

Табл. 5. Библиогр. 17 назв.

TECHNOLOGIES AND EFFICIENT USE OF PEAT ASH MASTICS FOR WATERPROOFING OF BRIDGE AND TUNNEL STRUCTURES

*LYAHEVICH G. D.¹⁾, LYAHEVICH A. G.¹⁾,
AGABABA RANGRAZ ALIREZA NAJIB¹⁾, DALIDOVSKAYA A. A.¹⁾*

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

A promising way to protect bridges and tunnels from aggressive water surface waterproofing is organic-based binder. Its structural strength can be increased by the introduction of particle sizes comparable to asphaltene dispersion medium and the elasticity due to the introduction of polymers. These theoretical background indicate simultaneous flexibility at low temperatures and high heat resistance to organic-based mastic binders. In this regard, it sets a goal to obtain paste with high flexibility and high heat resistance by using finely divided activated peat ash. To achieve this goal used: rubber crushed TU 38.108035–87; divinylstyrolny termoelastplast DST-30R-20PS; bitumen grade 20/30 for STB EN 12591–2010; ash from burning peat Lida peat briquette plant; general-purpose industrial oil selective treatment with high viscosity index; superplasticizer – sodium salt of the condensation product sulfoksidata aromatics with formaldehyde and sodium hydroxide neytralizatsii type 1. With the use of these materials has been developed compositions and technology of preparation of organic-compound. Their tests showed that the modification of finely mastic peat ash, activated superplasticizer NSPKSAUsF-1, various polymer additives, contributes to an increase in their heat resistance, elasticity, water resistance, and allows you to adjust their technological and operational characteristics. Thus experimentally confirmed that the peat ash, used successfully for the preparation of high-quality waterproofing mastic, so necessary for the protection of bridge and tunnel constructions. Its use will provide not only a great economic impact, but also contribute to the improvement of ecological situation in the areas of burning peat and ash disposal.

Keywords: paste, ash, experimental studies, physical and mechanical properties, protection, bridge and tunnel constructions, economic and ecological effects.

Tabl. 5. Bibl. 17 titles.

Введение. Долговечность бетонных и железобетонных конструкций мостов и тоннелей достигается эффективной гидроизоляцией. Срок ее службы в атмосфере около 5–14 лет [1–4]. Среди основных причин разрушения мостовых и тоннельных сооружений – образование протечек в местах сопряжения гидроизоляции, а также изменившаяся экология, неправильный выбор типа и конструкции гидроизоляции, некачественное выполнение гидроизоляционных работ и др.

Наиболее распространенным видом при строительстве мостов, прежде всего малых и средних, является обмазочная гидроизоляция. Применение обмазочной гидроизоляции на основе органоминерального вяжущего – один из эффективных методов защиты мостовых и тоннельных конструкций от агрессивного воздействия окружающей среды. Основные компоненты обмазочных битумно-полимерных гидроизоляционных мастик – битум, пластификатор, полимер и наполнитель. Свойства таких композиций существенно зависят от структуры и свойств битума.

Согласно классификации А. С. Колбановской [5, 6], различают битумы I, II и III структурных типов, которые можно отождествлять с коллоидными системами гель, золь и золь-гель. Битумы I типа содержат более 25 % асфальтенов, менее 24 % смол и более 50 % углеводородов. При этом доля асфальтенов в общей сумме асфальтосмолистых веществ составляет более 0,50, а отношение их к сумме углеводородов и смол – более 0,35. Битумы данного типа не рекомендованы для дорожного строительства в связи с низкой устойчивостью против воздействия окислительных факторов в процессе технологической переработки [6–14].

Битумы II типа содержат менее 18 % асфальтенов, более 36 % смол и менее 48 % углеводородов. Доля асфальтенов в общей сумме асфальтосмолистых веществ составляет менее 0,3, а отношение их к сумме углеводородов и смол – менее 0,2. Преимущества битумов данного типа – высокая когезия, деформационная устойчивость в упруговязком состоянии и повышенная сопротивляемость воздействию окислительных факторов, приводящих к старению [6, 7, 14–16]. К недостаткам относятся отсутствие эластического и упругопластического

состояний, низкая теплоустойчивость, плохая водоустойчивость. Ко II типу относятся битумы марок БН с регламентированными показателями свойств.

Битумы III типа содержат асфальтены (21–23 %), смолы (29–34 %) и углеводороды (46–50 %). При этом доля асфальтенов в общей сумме асфальтосмолистых веществ составляет 0,39–0,44, а их отношение к сумме углеводородов и смол 0,25–0,30. Структура битума III типа не имеет явно выраженных недостатков первых двух типов и рекомендована для применения во всех дорожно-климатических зонах под маркой БНД [5–9]. При изменении температуры можно наглядно проследить непрерывный переход структуры битумов от истинных растворов к дисперсиям – сначала неструктурированным «золям», когда дисперсная фаза представлена несвязными между собой дисперсными частицами, разделенными дисперсионной средой, затем структурированным – с дисперсионной фазой в виде коагуляционной сетки «гелям» и далее к конденсационным структурам с переходом в стеклообразное твердое состояние [6–8, 12–16].

Для создания такой гидроизоляции необходимо повысить когезионную прочность вяжущего путем увеличения коагуляционных контактов между компонентами мастики. Введение в битумное вяжущее наполнителя, размер частиц которого соизмерим с размерами частиц дисперсионной фазы, позволяет повышать вязкость дисперсионной среды, что обеспечит повышение теплостойкости и деформативности.

Для дисперсных систем имеется возможность использовать формулу Муни

$$\eta^* = \exp(ac_{\nu}/1 - kc_{\nu}), \quad (1)$$

где $\eta^* = \eta/\eta_s$; η^* – относительная сдвиговая вязкость системы; η – вязкость дисперсионной системы; η_s – вязкость дисперсионной среды; a – коэффициент, равный 2,5; c_{ν} – концентрация асфальтенов по объему; k – постоянная для каждой дисперсионной системы, подбирается экспериментально.

Если $k = 1,35$, то система наиболее упакована, а если $k = 1,91$ – тогда упаковка наименее плотная.

Благодаря исследованиям А. С. Колбановской [5, 6] вязкость битумов в зависимости от

концентрации в них асфальтенов по массе C_m преобразована в следующий вид:

$$\eta^* = \exp(5,2c_m/1 - 3,4c_m). \quad (2)$$

При этом с увеличением c_m возрастает отклонение η^*/c_m от линейной зависимости, и при критической концентрации $c_m = 18$ % мас. дисперсная фаза образует коагуляционный каркас из асфальтеновых комплексов. Увеличение значения c_m до 23 % мас. (вторая критическая точка) ведет к предельному уменьшению толщины сольватных оболочек за счет связывания части дисперсионной среды асфальтенами. Таким образом, структурная прочность битумов может быть повышена за счет введения частиц, сопоставимых с размерами асфальтенов, а эластичность дисперсионной среды – благодаря введению полимеров. Эти теоретические предпосылки указывают на возможность одновременного обеспечения гибкости при низких температурах и повышенной тепло-

стойкости для мастик на основе органоминеральных вяжущих.

Цель исследования – учитывая высказанные теоретические предпосылки, получить мастику с высокой гибкостью и повышенной теплоустойчивостью с использованием высокодисперсной активированной торфяной золы.

Характеристика исходных материалов.

Для приготовления гидроизоляционной мастики использовали перечисленные ниже материалы:

- дробленую резину по ТУ 38.108035–87 (размер зерен от 1 до 5 мм; потеря массы при высушивании 0,3 %; содержание включений черных металлов 0 %; содержание включений кордного волокна 2,1 % мас.);
- дивинилстирольный термоэластпласт ДСТ-30Р-20ПС по ТУ 38.40370–91;
- битум марки 20/30 по СТБ ЕН 12591–2010. Его характеристика представлена в табл. 1;

Таблица 1

Физико-химическая характеристика битума марки 20/30 по СТБ ЕН 12591–2010

Показатель	Метод испытания	Битум марки 20/30	Исследуемый битум
Пенетрация при 25 °С, 0,1 мм	EN 1426	20–30	29
Температура размягчения по кольцу и шару	EN 1427	55–63	56
Стойкость к затвердеванию при 163 °С:	EN 12607-1		
остаточная пенетрация, %		≥55	71
увеличение температуры размягчения, °С		≤8	4
изменение массы, %		≤0,5	0,2
Температура вспышки, °С	EN ISO 2592	≥240	253
Растворимость, % мас.	EN 12592	≥99,0	99,5
Индекс пенетрации	EN 12591–2010 Приложение А	От –1,5 до +0,7	–0,2
Температура хрупкости по Фраасу, °С	EN 12593	–	–12
Групповой химический состав:			
метано-нафтеновые			21,7
циклические ароматические:			28,4
моно~			8,7
би~			7,9
поли~			11,8
смолы			23,4
асфальтены			26,5
Содержание кислородсодержащих функциональных групп, мг КОН/г:	[7]		
карбоксильных, –COOH		–	0,71
сложноэфирных, –COOR		–	21,06
гидроксильных, –ОН		–	6,34
карбонильных, =C=O		–	2,62

• золу от сжигания торфа на Лидском торфобрикетном заводе (ТБЗ) следующего химического состава, мас. %: SiO_2 – 34,99; Al_2O_3 – 7,60; Fe_2O_3 – 10,65; CaO – 39,01; MgO – 2,12; MnO_2 – 0,18; K_2O – 0,94; Na_2O – 0,44; TiO_2 – 0,42; P_2O_5 – 1,13; SO_3 – 0,61; потери при прокаливании 1,86.

Активность торфяной золы: основной критерий, определяющий ее способность проявлять вяжущие свойства, – наличие кальция в свободном или связанном виде. Для оценки активности золы использовали следующие критерии [14, 15]:

– модуль основности (гидросиликатный модуль) M_o , который представляет собой отношение суммы основных оксидов к сумме кислотных оксидов;

– силикатный (кремнеземистый) модуль M_c , показывающий отношение оксида кремния, вступающего в реакцию с другими оксидами, к суммарному содержанию оксидов алюминия и железа;

– коэффициент качества K – отношение оксидов, повышающих гидравлическую активность к оксидам, снижающим ее.

Расчеты модуля основности (гидросиликатного) M_o , силикатного (кремнеземистого) модуля M_c , коэффициента качества K показали, что зола, полученная при сжигании торфа на Лидском ТБЗ, относится к скрыто активным золошлаковым материалам и требует интенсификации твердения. Результаты испытаний физических свойств торфяной золы Лидского ТБЗ представлены в табл. 2;

Таблица 2

Физические свойства золы, образующейся при сжигании торфа на Лидском ТБЗ (после помола в шаровой мельнице)

Физическое свойство	Показатель золы, отобранной на Лидском ТБЗ
Средняя плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	2246
Насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	728
Удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$	3209
Влажность, % мас.	0,36

• минеральное масло с характеристикой, представленной в табл. 3;

Таблица 3

Физико-химическая характеристика индустриального масла широкого назначения селективной очистки с повышенным индексом вязкости

Наименование показателя	Значение
Вязкость при 50 °С, $\text{мм}^2/\text{с}$	48,7
Индекс вязкости	86
Температура, °С:	
вспышки в открытом тигле	223
застывания	–19
Содержание, мас. %:	
механических примесей	Отсутствует
серы	0,4
водорастворимых кислот и щелочей	Отсутствует
фенола и воды	Отсутствует
Зольность, мас. %.	0,002
Коксуемость, мас. %	0,11
Кислотное число, мг КОН/г	0,03

• суперпластификатор – натриевая соль продукта конденсации сульфоксида ароматических углеводородов с формальдегидом и нейтрализации гидроокисью натрия, тип 1 (НСПКСАУсФ-1).

Для получения суперпластификатора были использованы:

– ароматические нефтепродукты – экстракт селективной очистки масел (плотность при 20 °С 0,9815 $\text{г}/\text{см}^3$; показатель преломления 1,5804; молекулярная масса 264; пределы кипения 232–436 °С; групповой химический состав, мас. %: парафино-нафтенновые 8,1; циклические ароматические 91,2; смолы 0,7; количество кислородсодержащих функциональных групп, мг КОН/г: карбоксильных (–COOH) 0,12; сложноэфирных (–COOR) 1,38; гидроксильных (–OH) 0,21; карбонильных (>C=O) 0,15;

– кальцинированная сода марки Б ОКП 21 3111 0100 второго сорта ОКП 21 3111 0140 с содержанием Na_2CO_3 99,3 мас. %;

– олеум 20%-й с содержанием серной кислоты 104,5 % плотностью 1,8965 $\text{г}/\text{см}^3$;

– гидроокись натрия 42,5 % (водный раствор).

Суперпластификатор получен на кафедре мостов и тоннелей БНТУ по следующей технологии. Предварительно получали оксидат ароматических углеводородов (оксидат масла ПН-6ш) путем окисления ароматических углеводородов кислородом воздуха при температуре 175 °С в присутствии катализатора гидроокиси натрия при атмосферном давлении.

Суперпластификатор получали путем сульфирования оксидата ароматических углеводородов 20%-м олеумом (из расчета 1,00 мас. часть оксидата и 1,25 мас. частей олеума) при температуре 156 °С в течение 92 мин; продукт сульфирования конденсировали формальдегидом при 128 °С в течение 3,4 ч, а затем массу нейтрализовали гидроокисью натрия до pH = 7,3. В результате получили суперпластификатор со следующими качественными показателями: массовая доля сухих веществ 62,3 %, плотность при 20 °С 1,2756 г/см³, показатель активности водородных ионов 8,12;

- микрокремнезем марки МК-85 (ТУ 5743-048-02495332), который подвергался активации при температуре ±110 °С. Характеристика микрокремнезема после активации: истинная плотность 2,2436 г/см³, удельная поверхность 21,97 м²/г, в неуплотненном состоянии с насыпной плотностью 169 кг/м³.

Технология приготовления гидроизоляционной мастики. Расчетное количество нефтяного битума марки 20/30 (СТБ ЕН 12591–2010) загружали в лопастную мешалку, нагревали до температуры 150–180 °С, подавали резиновую крошку, модифицированную индустриальным маслом широкого назначения селективной очистки с повышенным индексом вязкости (табл. 2), и дивинилстирольный термоэластпласт ДСТ-30Р-20ПС. Массу перемешивали в течение 20–30 мин, затем вводили высокодисперсную торфяную золу, активированную суперпластификатором НСПКСАУсФ-1, смесь перемешивали в течение 10–15 мин до однородной массы и готовую гидроизоляционную мастику выгружали, охлаждали и исследовали. Образцы мастик испытывали по [16].

Составы гидроизоляционной мастики представлены в табл. 4, характеристики исследуемых мастик даны в табл. 5.

Таблица 4

Состав гидроизоляционных мастик

Компонент	Состав образцов мастик, мас. %				
	1	2	3	4	5
Битум нефтяной марки 20/30	59,3	56,8	54,3	51,8	49,3
Термоэластпласт дивинилстирольный ДСТ-30Р-20ПС	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
Резина дробленая (ТУ 38.108035–87)	11,2	11,2	11,2	11,2	12,2
Масло минеральное индустриальное	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6
Суперпластификатор НСПКСАУсФ-1	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Зола от сжигания торфа на Лидском ТБЗ	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5

Таблица 5

Физико-механические характеристики гидроизоляционных мастик

Компонент	Состав образцов мастик, мас. %				
	1	2	3	4	5
Теплостойкость, °С	78	87	101	109	118
Гибкость, °С	–42	–41	–38	–32	–27
Потеря массы при 163 °С за 5 ч, %	0,35	0,31	0,27	0,24	0,21
Температура вспышки, °С	>250	>250	>250	>250	>250
Водонепроницаемость в течение 72 ч при давлении 0,001 МПа	Выдерживает	Выдерживает	Выдерживает	Выдерживает	Выдерживает
Прочность сцепления при (20 ± 5) °С, МПа:					
	с бетоном	0,19	0,23	0,26	0,34
с металлом	0,17	0,18	0,21	0,32	0,29
Водопоглощение в течение 24 ч, % по массе	0,15	0,18	0,21	0,34	0,42

ВЫВОДЫ

1. Исследования показали, что структурная прочность мастик увеличивается за счет введения частиц, сопоставимых с размерами асфальтенов, а эластичность дисперсионной среды – благодаря введению полимера ДСТ (табл. 3). Модификация мастик высокодисперсной торфяной золой, активированной суперпластификатором НСПКСаУсФ-1, различными полимерными добавками, содействует повышению их теплостойкости, эластичности, водонепроницаемости, а также позволяет регулировать технологические и эксплуатационные свойства мастик.

2. Экспериментально подтверждено, что высокодисперсная торфяная зола, активированная суперпластификатором НСПКСаУсФ-1, может успешно применяться для приготовления высококачественных гидроизоляционных мастик, так необходимых для защиты мостовых и тоннельных конструкций. Ее использование обеспечит не только большой экономический эффект, но и будет способствовать улучшению экологической обстановки в местах сжигания торфа и захоронения золы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новые гидроизоляционные и кровельные материалы и их долговечность / А. М. Кисина [и др.]. – Л.: Энергия, 1980. – 80 с.
2. Виноградский, Д. Ю. Эксплуатация и долговечность мостов / Д. Ю. Виноградский, Ю. Д. Руденко, А. А. Шкуратовский. – Киев: Будвельник, 1985. – 104 с.
3. Джигит, С. Г. Проблемы долговечности железобетонных мостов / С. Г. Джигит, Ю. Л. Родин, Д. Г. Джигит // Автодорожник Украины. – 1990. – № 2. – С. 32–34.
4. Джигит, С. Г. Надійний гідроізоляційний захист – запорука довговічності транспортних споруд / С. Г. Джигит, Ю. Л. Родин, Н. А. Кузьмина // Автошляховик України. – 2001. – № 2. – С. 39–42.
5. Колбановская, А. С. Исследование дисперсных структур в нефтяных битумах с целью получения оптимального материала для дорожного строительства: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.17.07 А. С. Колбановская / Московский институт нефтехимической и газовой промышленности имени И. М. Губкина. – М., 1967. – 54 с.
6. Колбановская, А. С. Дорожные битумы / А. С. Колбановская, В. В. Михайлов. – М.: Транспорт, 1973. – 264 с.
7. Гун, Р. Б. Нефтяные битумы / Р. Б. Гун. – М.: Химия, 1989. – 432 с.

8. Руденская, И. М. Реологические свойства битумов / И. М. Руденская, А. В. Руденский. – М.: Высш. шк., 1967. – С. 3–12.

9. Руденская, И. М. Состав, структура и физико-механические свойства нефтяных битумов / И. М. Руденская, А. В. Руденский // Дороги и мосты. – 2009. – № 22. – С. 278–295.

10. Сюняев, З. И. Реологические свойства битумов в области фазового перехода / З. И. Сюняев, А. А. Гуреев, С. А. Бегунц // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1983. – № 1. – С. 48–52.

11. Сюняев, З. И. Физико-химическая механика дисперсных систем / З. И. Сюняев. – М.: МИНХ и ГП имени И. М. Губкина, 1981. – 90 с.

12. Руденская, И. М. Органические вяжущие для дорожного строительства / И. М. Руденская, А. В. Руденский. – М.: Транспорт, 1984. – 229 с.

13. Киричек, Ю. А. Экспериментальные исследования свойств модифицированных битумов, применяющихся в дорожном строительстве / Ю. А. Киричек, В. В. Демьяненко, А. А. Сухоребрий // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2008. – № 6–7. – С. 14–17.

14. Ляхевич, Г. Д. Технология и экономика вяжущих материалов с использованием кислых гудронов / Г. Д. Ляхевич, А. Г. Ляхевич. – Минск: БНТУ, 2006. – 251 с.

15. Ляхевич, Г. Д. Технология термопластификации сапропелитовых и каменных углей / Г. Д. Ляхевич, А. Г. Ляхевич. – Минск: БНТУ, 2009. – 250 с.

16. Ляхевич, Г. Д. Технология и экономика переработки вторичных резиновых материалов, включая шины с металлокордом / Г. Д. Ляхевич, А. Г. Ляхевич. – Минск: БГПА, 1999. – 244 с.

17. Ляхевич, Г. Д. Технология производства гидроизоляционных работ: метод. пособие / Г. Д. Ляхевич. – Минск: БНТУ, 2013. – 140 с.

Поступила 20.10.2015

REFERENCES

1. Kisisina, A. M., Ladyzhenskajab L. L., Popchenko, S. N., & Trofimov, V. N. (1980) *New Waterproof and Roofing Materials and their Durability*. Leningrad, Energia. 80 p. (in Russian).
2. Vinogradsky, D. Yu., Rudenko, Yu. D., & Shkuratovsky, A. A. (1985) *Operation and Durability of Bridges*. Kiev, Publishing House "Budivelnik". 104 p. (in Russian).
3. Djigit, S. G., Rodin, Yu. L., & Djigit, D. G. (1990) Problems in Durability of Reinforced Concrete Bridges. *Avtodorozhnik Ukrainy* [Automobile Road Builder of the Ukraine], 2, 32–34 (in Russian).
4. Djigit, S. G., Rodin, Ju. L., Kuzmina, N. A. (2001) Reliable Waterproof Protection – Durability Guarantee of Transport Infrastructure Facilities. *Avtošliakhovik Ukrainy* [Automobile Road Builder of the Ukraine], 2, 39–42 (in Ukrainian).
5. Kolbanovskaya, A. S. (1967) *Issledovanie Dispersnyh Struktur v Neftjanyh Bitumah s Celju Poluchenija Optimalnogo Materiala dlja Dorozhnogo Stroitelstva*. Avtoref. Dis. d-ra

tehn. nauk [Investigation of Disperse Structures in Oil Bitumen with the Purpose to Obtain Optimum Material for Road Construction. Extended Abstract of Dissertation on D.Sc. in Engineering]. Moscow. 54 p. (in Russian).

6. Kolbanovskaya, A. S., & Mikhailov, V. V. (1973) *Road Bitumen*. Moscow, Transport. 264 p. (in Russian).

7. Gun, R. B. (1989) *Oil Bitumen*. Moscow, Khimiya. 432 p. (in Russian).

8. Rudenskaya, I. M., & Rudensky, A. V. (1967) *Rheological Properties of Bitumen*. Moscow, Vysshaya Shkola, 3–12 (in Russian).

9. Rudenskaya, I. M., & Rudensky, A. V. (2009) Composition, Structure and Physical and Mechanical Properties of Oil Bitumen. *Dorogi i Mosty* [Roads and Bridges], 22, 278–295 (in Russian).

10. Sunyaev, Z. I., Gureev, A. A., Begunts, S. A. (1983) Rheological Properties of Bitumen in the Field of Phase Transition. *Izvestija Vysshih Uchebnyh Zavedenij. Neft i Gaz* [Higher Educational Institutions News. Oil and Gas], 1, 48–52 (in Russian).

11 Sunyaev, Z. I. (1981) *Physical and Chemical Mechanics of Disperse Systems*. Moscow: Moscow Institute of Petrochemical Oil and Gas Industry Named After I. M. Gubkin. 90 p. (in Russian).

12. Rudenskaya, I. M., & Rudensky, A. V. (1984) *Organic Binders for Road Construction*. Moscow, Transport. 229 p. (in Russian).

13. Kirichek, Yu. A., Demyanenko, V. V., Sukhorebry, A. A. (2008) Experimental Investigations on Properties of Modified Bitumen Applied in Road Construction. *Visnik Pridniprovskoi Derzhavnoi Akademii Budivnictva ta Arhitekturi* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture], 6–7, 14–17 (in Ukrainian).

14. Lyakhevich, G. D., & Lyakhevich, A. G. (2006) *Technology and Economics of Binding Materials while Using Acid Sludge*. Minsk: BNTU. 251 p. (in Russian).

15. Lyakhevich, G. D., & Lyakhevich, A. G. (2009) *Technology of Thermoplastification for Sapropelite and Bituminous Coal*. Minsk: BNTU. 250 p. (in Russian)

16. Lyakhevich, G. D., & Lyakhevich, A. G. (1999) *Technology and Economics for Recycling of Secondary Rubber Materials Including Tyres with Steel Cords*. Minsk: BSPA. 244 p. (in Russian).

17. Lyakhevich, G. D. (2013) *Technology for Execution of Waterproofing Works*. Minsk: BNTU. 140 p. (in Russian).

Received 20.10.2015

**Перечень статей, опубликованных
в журнале «Наука и техника» в 2015 г.**

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Аземша С. А., Галушко В. Н., Скирковский С. В., Врубель Ю. А. Анализ данных дорожно-транспортных происшествий и их причин для г. Гомеля за 2013 и 2014 гг.	3
Василевич Ю. В., Довнар С. С. Анализ резонансного поведения несущей системы крупногабаритного станка типа «подвижная стойка»	5
Василевич Ю. В., Довнар С. С., Трусовский А. С., Шумский И. И. Моделирование и анализ динамики несущей системы фрезерно-сверлильно- расточного станка с моностойкой	3
Григорова Т. М. Вопросы оптимизации транспортных систем пригородного сообщения	5
Девойно О. Г., Оковитый В. В. Плазменные теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония с повышенной термостойкостью	1
Жданович Ч. И., Калинин Н. В. Выбор способа регулирования тягового асинхронного электродвигателя трактора и построение механической характеристики	3
Иванов И. А., Нарушко Е. О. Влияние геометрических размеров катода вакуумного электродугового испарителя плазмы на величину допустимого тока дугового разряда	3
Калиниченко А. С., Кукареко В. А., Калиниченко В. А. Структура быстрозакаленных лент после естественного старения	1
Капский Д. В. Повышение качества дорожного движения в очагах аварийности	3
Капский Д. В., Мозалевский Д. В., Кузьменко В. Н., Коржова А. В., Полховская А. С., Костюкович Е. Н., Арюшевская Н. В. Аудит безопасности дорожного движения на локальном объекте дорожной сети Минска	1
Капский Д. В., Пегин П. А. Методика прогнозирования аварийности по методу конфликтных зон в конфликте «транзитный транспорт – пешеход» на основе моделей движения на регулируемом перекрестке	5
Карпунин И. И., Кузьмич В. В., Балабанова Т. Ф. Классификация биологически разлагаемых полимеров	5
Качанов И. В., Жук А. Н. Экспериментальные исследования по определению силы давления струи рабочей жидкости на плоские поверхности заготовок-препятствий различной формы	3
Качанов И. В., Кудин М. В., Ленкевич С. А. Компьютерное моделирование в Deform-3D для анализа пластического течения при скоростном горячем выдавливании биметаллических формообразующих деталей штамповой оснастки	1
Киселев М. Г., Дроздов А. В., Монич С. Г., Богдан П. С. Влияние электроконтактной обработки поверхности самореза на условия его вкручивания в образцы из различных материалов и выкручивания из них	5
Козерук А. С., Лаптева Е. О., Филонов И. П., Филонова М. И. Математическое моделирование процесса одновременной двусторонней обработки линз	1
Козлов А. А. Азотный потенциал при ионном азотировании в плазме тлеющего разряда	1
Котлобай А. Я., Котлобай А. А., Юнусов Ю. Ш., Тамело В. Ф. Развитие систем приводов рабочего оборудования инженерной техники	5
Кузьмич В. В. Способ получения волокнистого полуфабриката для производства упаковки	1
Ловшенко Ф. Г., Ловшенко Г. Ф. Закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств при механическом легировании двойных алюминиевых композиций	1

Мойсейчик А. Е., Василевич Ю. В. Теплообразование и сопротивление деформированию конструкционной стали	5
Мохаммед Салем А. А., Мельникова Г. Б., Маханёк А. А., Чижик С. А. Новые способы обработки результатов наноиндентирования методом атомно-силовой микроскопии	1
Нурминский Е. А., Пугачев И. Н., Шамрай Н. Б., Седюкевич В. Н. Определение пассажиропотоков в региональной транспортной системе на основе модифицированных гравитационных моделей	5
Оковитый В. В. Выбор оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий	5
Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Асташинский В. М., Оковитый В. В., Соболевский С. Б. Разработка технологии нанесения плазменных композиционных покрытий на основе диоксида циркония для систем космических аппаратов	3
Пилипенко О. М., Васильченко В. Ю., Подгорный Н. В., Пилатов А. Ю. Синтез системы зажигания автомобиля, работающего на озонированном топливе	1
Пугачев И. Н., Куликов Ю. И., Седюкевич В. Н. Показатели качественного функционирования транспортного комплекса Российской Федерации	3
Саньоцкий А. М. Расчет контактных напряжений сопряженных поверхностей в сфероглобoidном сухарном синхронном карданном шарнире	1
Старосотников Н. О., Фёдорцев Р. В. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприемниками	5
Суходоев В. Н., Трушкина А. В., Лапенко Н. В. Эффект обжата нагружаемого рельса полущалами L-образного сечения	3
Таяновский Г. А., Басалай Г. А. Специфика и направления улучшения динамики торможения активных тракторных поездов	1
Филонов И. П., Козерук А. С., Лаптева Е. О., Филонова М. И., Кузнечик В. О., Василевич А. В. Управление процессом одновременного двустороннего формообразования линз на предварительной стадии обработки	3
Шелег В. К., Молочко В. И., Данильчик С. С. Условия устойчивого стружкодробления и обеспечения качества обработанных поверхностей при точении с асимметричными колебаниями инструмента	3
Шматок Е. В., Остриков О. М. Метод расчета полей смещений и напряжений в системе параллельных линзовидных механических двойников, возникающих в мартенситной фазе магнитного сплава Ni ₂ MnGa, обладающего свойством запоминания формы	5

СТРОИТЕЛЬСТВО

Бекбасаров И. И., Исаков Г. И. Забивные полипрочные железобетонные сваи и новая конструкция свайного наголовника	2
Бондаренко С. Н., Чулкин П. В., Рагойша Г. А., Коликов А. О., Бондаренко А. С. Исследование процесса твердения цементобетонного конгломерата методом импедансной спектроскопии	6
Вавилов П. В., Кравченко С. Е. Добавки в холодные асфальтобетоны из эмульсионно-минеральных смесей	6
Гущин С. В., Бабицкий В. В. Экспресс-метод оценки эффективности противоморозных добавок	6
Земляков Г. В. Моделирование процесса тепловой обработки бетона монолитных конструкций	6
Ковалев Я. Н. Инновационные технологии в дорожном материаловедении	2
Леонович С. Н., Ольгомец А. И., Гуринович В. Ю., Карпович С. Л. Мобильные растворобетонные установки для строительного комплекса Республики Беларусь: основные преимущества и недостатки	2
Леонович С. Н., Ольгомец А. И., Гуринович В. Ю., Карпович С. Л. Основные модификации растворобетонных узлов блочно-модульной компоновки	2
Леонович С. Н., Передков И. И. Технология устройства облегченных пустотообразователями железобетонных плит перекрытия с предварительным напряжением арматуры в построчных условиях	6
Леонович С. Н., Свиридов Д. В., Щукин Г. Л., Радюкевич П. И., Беланович А. Л., Савенко В. П., Карпушенков С. А. Сухая смесь для получения пенобетона	6
Ляхевич Г. Д., Ляхевич А. Г., Агабаба Ранграз Алиреза Наджиб, Далидовская А. А. Технология и эффективность использования торфяной золы в мастике для гидроизоляции мостовых и тоннельных конструкций	6

Ляхевич Г. Д., Ляхевич А. Г., Ортнер Д. В. Технология и эффективность использования торфяных зол в цементобетоне	2
Михайлов В. И., Кононович С. И., Чиберкус Ю. Н. Экспериментальные измерения крена башенных сооружений электронным тахеометром	2
Нестеренок М. С., Вексин В. Н. Применение электронного тахеометра для исполнительной съемки лифтовых шахт	2
Осиновская В. А. Прогнозирование долговечности асфальтобетонных покрытий на основе уровней их виброн нагруженности	6
Осипов С. Н., Поздняков Д. А. Об оценке физического износа упругопластических элементов зданий	6
Осипов С. Н., Поздняков Д. А. Об оценке физического износа элементов технических устройств	2
Седлухо Ю. П., Станкевич Ю. О. Исследования процесса биохимической очистки подземных вод от сероводорода	2
Сернов В. А. Экспериментальные исследования свайно-плитных фундаментов из коротких конических свай на строительных площадках г. Минска	2
Солодка М. Г., Тур А. Н., Ковалев Я. Н. Особенности повышения эффективности функционирования автодорожного комплекса Республики Беларусь	6
Фам Нгок Киен Обоснование объемов и режимов подачи воды на орошение в зависимости от стока рек предгорных районов Вьетнама	2
Хрусталева Б. М., Яглов В. Н., Ковалев Я. Н., Романюк В. Н., Бурак Г. А., Меженцев А. А., Гуринович Н. С. Наномодифицированный бетон	6
Шейда О. Ю., Батяновский Э. И. Влияние комплексной химической добавки, содержащей структурированный углеродный наноматериал, на свойства цемента	2
Юхневский П. И., Широкий Г. Т. Об идентификации пластифицирующих добавок для бетонов	6
Яглов В. Н., Ковалев Я. Н., Романюк В. Н., Бурак Г. А. Безавтоклавный силикатный кирпич	2

ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Аземша С. А., Галушко В. Н., Скиркоцкий С. В. Совершенствование экспертного анализа дорожно-транспортных происшествий с помощью компьютерных программ моделирования	4
Гончаров А. А. О комплексном подходе к моделированию функционирования технологических машин	4
Грабауров В. А. Беларусь на пороге создания интеллектуальных транспортных систем	4
Gulay A. V., Zaytsev V. M. Intellectual Mechatronic Systems with Remote Component Interaction: Structure and Functions	4
(Гулай А. В., Зайцев В. М. Интеллектуальные мехатронные системы с дистанционным взаимодействием компонентов: структура и функции)	4
Дайняк И. В., Карпович С. Е., Кекиш Н. И., Голдын Л. Прецизионная система перемещений для оптико-механического оборудования микроэлектроники	4
Карпиевич Ю. Д., Бондаренко И. И. Уровень информационного сигнала от датчика линейного перемещения поршня гидроподжимной муфты коробки передач как показатель степени ее износа и величины остаточного ресурса	4
Муравьев А. В., Кучеренко О. К. Композиции атермализованных трехкомпонентных инфракрасных объективов	4
Невдах В. В. Моделирование динамики пожаров с разной скоростью роста в помещении с естественной вентиляцией	4
Стрижнев А. Г., Русакович А. Н. Система автоматического управления переменной структуры с цифровыми регуляторами	4

ЭКОНОМИКА ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кажуро Н. Я. Конкуренция как механизм рынка	4
Романюк В. Н., Муслина Д. Б. Прогнозирование объемов производства предприятий легкой промышленности для определения их потребности в энергоресурсах (Часть 1)	4
Романюк В. Н., Муслина Д. Б. Прогнозирование объемов производства предприятий легкой промышленности для определения их потребности в энергоресурсах (Часть 2)	5

НЕКРОЛОГ

Игорь Евгеньевич ЗУЙКОВ	1
-------------------------------	---