

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)

ISSN 2658-6991 (Online)

№6



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU ИЮНЬ 2020 г. (781)

ПОДПИСКА НА 2021 ГОД

www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y-e70886

на почте:
индекс 70886



на сайте:

www.journal-cm.ru

www.rifsm.ru/page/5

через редакцию:

направляйте заявку в произвольной форме

mail@rifsm.ru

rifsm@mail.ru

(499) 976-20-36, 976-22-08



Комитет Торгово-промышленной палаты РФ по предпринимательству
в сфере строительства

АО «ЦНИИЭП жилища – институт комплексного проектирования
жилых и общественных зданий» (АО «ЦНИИЭП жилища»)

Объединенная редакция научно-технических журналов
«Жилищное строительство» и «Строительные материалы»®



X Международная научно-практическая конференция «InterConPan-2020: инновации для индустриального домостроения»

InterConPan-2020

International Conference of Large-panel Construction

7-9 сентября 2020 г. / September 7-9, 2020

Москва / Moscow

Место проведения: Конгресс-центр Торгово-промышленной палаты РФ

(Москва, ул. Ильинка, 6/1, стр. 1)



ТЕМАТИКА:

- Оборудование и технологии для модернизации предприятий КПО
- Инновационные строительные системы
- BIM технологии в сборном домостроении
- Современные бетоны, добавки и пигменты
- Архитектурно-планировочные решения
- Новые решения фасадов и внутренней отделки
- Качество и энергоэффективность индустриальных зданий
- Опыт строительства крупнопанельного жилья

ПРОГРАММА:

7 сентября Пленарное заседание

Секции: «Архитектура крупнопанельных зданий»;
«Инновационная технология предприятий индустриального домостроения»

8 сентября Выездная сессия

ЗАО «198 КЖИ» (АО ХК «ГВСУ «Центр»),
г. Можайск
Завод БЭНПАН (ООО «БЭНСТРОЙ»),
Московская обл.

9 сентября Выездная сессия

Ростокинский завод ЖБК (ООО «Первый ДСК»)
г. Москва



Генеральный спонсор:



Постоянный спонсор:

PROGRESS GROUP

Постоянный партнер:

ALLBAU
software

Партнеры:



Электронная заявка: www.interconpan.ru

Организационный комитет:

Телефон: 8 903 550-20-35, +7 (499) 976-20-36, 976-22-08

kpd-conf@mail.ru

mail@rifsm.ru

www.rifsm.ru

Адрес для корреспонденции: 127434, Москва, Дмитровское ш., д. 9, стр. 3, оф. 408, редакция журнала «Жилищное строительство»

Современные бетоны

В.И. РИМШИН, П.С. ТРУНТОВ, Е.С. КЕЦКО, А.С. НАГУМАНОВА	
Комплексный подход к контролю качества высокопрочного бетона в период эксплуатации.	4
Д.А. СИНИЦИН, А.С. САЛОВ, И.Г. ТЕРЕХОВ, А.А. ТИМОФЕЕВ	
Высокоэффективные бетоны нового поколения при строительстве зданий повышенной этажности в Республике Башкортостан	8
Г.А. МОИСЕЕНКО	
Изменение призмочной прочности и модуля упругости высокопрочного сталефибробетона и его матрицы в зависимости от возраста	13
К.В. ШУЛДЯКОВ, Б.Я. ТРОФИМОВ, Л.Я. КРАМАР	
Высокоморозостойкий бетон без воздухоовлечения	18
С.В. ФЕДОСОВ, В.Е. РУМЯНЦЕВА, В.С. КОНОВАЛОВА, А.С. ЕВСЯКОВ, Н.С. КАСЬЯНЕНКО	
Моделирование динамики массопереноса в процессах жидкостной коррозии цементных бетонов с учетом явления кольматации	27

Материалы и технологии

В.Г. ГАГАРИН, П.П. ПАСТУШКОВ	
Сорбция водяного пара материалами минераловатных изделий современного производства. Часть II.	33
П.П. ПАСТУШКОВ, С.И. ГУТНИКОВ, Н.В. ПАВЛЕНКО, М.Д. СТОЛЯРОВ	
Исследования теплопроводности рулонных материалов на основе аэрогеля.	39
Н.П. УМНЯКОВА	
Метод оценки термического сопротивления вспененного полиэтилена с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги	44
М.Ю. ЛЕШКО, А.В. СИДОРОВА, А.В. ВАРГАСОВ, П.А. КОЩЕЕВ	
Использование эластомеров в качестве звукопоглощающих материалов в глушителях шума вентиляционных систем	50
А.Д. ЖУКОВ, И.В. БЕССОНОВ, Л.К. БОГОМОЛОВА, Н.А. ИВАНОВА, И.С. ГОВРЯКОВ	
Вспененные полимеры в системах изоляции конструкций, возводимых на проблемных грунтах	54
К.П. ЗУБАРЕВ	
Экспериментальное определение коэффициента паропроницаемости образца строительного материала при вертикальном положении	59
В.Е. АБРАМОВ	
Закономерности накопления радона в помещениях зданий и сооружений	65

Founder of the journal:
«STROYMATERIALY»
Advertising-Publishing Firm, OOO
Registration certificate PI № 77-1989
Included in the list of journals of
the Higher Attestation Commission
(Russia), Project Russian Science
Citation Index (Russia), Russian
Science Citation Index on the platform
Web of Science

Editorial address:
9/3 Dmitrovskoye Highway,
127434, Moscow, Russian Federation

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 6

Founded in 1955

(781) June 2020

Tel.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Modern concretes

- V.I. RIMSHIN, P.S. TRUNTOV, E.S. KETSKO, A.S. NAGUMANOVA
Comprehensive Approach to Quality Control of High-Strength Concrete During Operation..... 4
- D.A. SINITSIN, A.S. SALOV, I.G. TEREKHOV, A.A. TIMOFEEV
**Highly Efficient New Generation Concretes in the Construction of High-Rise Buildings
in the Republic of Bashkortostan 8**
- G.A. MOISEENKO
**Changes in the Prismatic Strength and Elastic Modulus of High-Strength Steel Fiber Concrete
and its Matrix Depending on the Age..... 13**
- K.V. SHULDYAKOV, B.Ya. TROFIMOV, L.Ya. KRAMAR
High-Frost-Resistant Concrete without air Entrainment 18
- S.V. FEDOSOV, V.E. RUMYANTSEVA, V.S. KONOVALOVA, A.S. EVSYAKOV, N.S. KASYANENKO
**Modeling of Mass Transfer Dynamics in the Processes of Liquid Corrosion of Cement Concretes
with Due Regard for the Phenomenon of Colmatation..... 27**

Materials and technologies

- V.G. GAGARIN, P.P. PASTUSHKOV
Sorption of Water Vapor Materials of Mineral Wool Products of Modern Manufacture. Part II..... 33
- P.P. PASTUSHKOV, S.I. GUTNIKOV, N.V. PAVLENKO, M.D. STOLYAROV
Investigation of Thermal Conductivity of Rolled Materials Based on Aerogel 39
- N.P. UMNIAKOVA
**Method for evaluating the Thermal Resistance of Foamed Polyethylene
with Reflective Heat Insulation Made of Aluminum Foil..... 44**
- M.Yu. LESHKO, A.V. SIDORINA, A.V. VARGASOV, P.A. KOSHEEV
Use Of Elastomers as Sound-Absorbing Materials in Silencers for Ventilation Systems 50
- A.D. ZHUKOV, I.V. BESSONOV, L.K. BOGOMOLOVA, N.A. IVANOVA, I.S. GOVRYAKOV
Foamed Polymers in Insulation Systems for Structures Constructed on Problematic Soils 54
- K.P. ZUBAREV
**Experimental Determination of the Vapor Permeability Coefficient of a Sample
of Building Material in Vertical Position 59**
- V.E. ABRAMOV
Regularities of Radon Accumulation in Premises of Buildings and Structures 65

Редакционный совет

Главный редактор:

ЮМАШЕВА Е.И.,

инженер-химик-технолог, почетный строитель России

Председатель редакционного совета:

РЕСИН В.И.,

д-р экон. наук, профессор, академик РААСН (Москва)

АЙЗЕНШТАДТ А.М.,

д-р хим. наук, профессор (Архангельск)

АСКАДСКИЙ А.А.,

д-р хим. наук, профессор (Москва)

БУРЬЯНОВ А.Ф.,

д-р техн. наук, директор Российской гипсовой ассоциации (Москва)

ВАЙСБЕРГ Л.А.,

д-р техн. наук, профессор, академик РАН (Санкт-Петербург)

ВЕРЕЩАГИН В.И.,

д-р техн. наук, профессор (Томск)

ГОРИН В.М.,

канд. техн. наук, президент Союза производителей керамзита и керамзитобетона (Самара)

ЕРОФЕЕВ В.Т.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Саранск)

КОРОЛЕВ Е.В.,

д-р техн. наук, профессор (Москва)

КРИВЕНКО П.В.,

д-р техн. наук, профессор (Украина)

ЛЕОНОВИЧ С.Н.,

д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

ЛЕСОВИК В.С.,

д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН (Белгород)

МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,

д-р техн. наук, профессор (Грозный)

НЕДОСЕКО И.В.,

д-р техн. наук (Уфа)

ПИЧУГИН А.П.,

д-р техн. наук, профессор (Новосибирск)

ПУХАРЕНКО Ю.В.,

д-р техн. наук, профессор,
член-корреспондент РААСН (Санкт-Петербург)

ТРАВУШ В.И.,

д-р техн. наук, академик РААСН (Москва)

ФЕДОСОВ С.В.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Иваново)

ФИШЕР Х.-Б.,

доктор-инженер (Германия)

ХОЗИН В.Г.,

д-р техн. наук, профессор (Казань)

ЧЕРНЫШОВ Е.М.,

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Воронеж)

ШЕБЛ С.М.,

д-р наук, профессор (Египет)

ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,

канд. техн. наук (Омск)

ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,

д-р техн. наук, профессор (Израиль)

ЯКОВЛЕВ Г.И.,

д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

Ю ЖЯНГМЯО,

д-р философии (Китай, Гуанчжоу)

Editorial Board

Editor-in-chief

YUMASHEVA E.,

engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

Chairman of Editorial Board

RESIN V.,

Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

AYZENSHTADT A.,

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

ASKADSKIY A.,

Doctor of Science (Chemistry),
Professor (Moscow)

BUR'YANOV A.,

Doctor of Science (Engineering), Director of the Russian Association of gypsum (Moscow)

VAYSBERG L.,

Doctor of Science (Engineering), Academician of RAS (St. Petersburg)

VERESHCHAGIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

GORIN V.,

Candidate of Science (Engineering), President of the Union of Haydite and Haydite Concrete Producers (Samara)

EROFEEV V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Saratov)

KOROLEV E.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Moscow)

KRIVENKO P.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Ukraine)

LEONOVICH S.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Belarus, Minsk)

LESOVIK V.,

Doctor of Science (Engineering), Corresponding Member of RAACS (Belgorod)

MURTAZAEV S.-A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Grozniy)

NEDOSEKO I.,

Doctor of Science (Engineering) (Ufa, Bashkortostan)

PICHUGIN A.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Member of the Russian Academy of Natural Science (Novosibirsk)

PUKHARENKO Yu.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (St. Petersburg)

TRAVUSH V.,

Doctor of Science (Engineering), academician of RAACS (Moscow)

FEDOSOV S.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Ivanovo)

FISHER H.-B.,

Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

KHOZIN V.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

CHERNYSHOV E.,

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Voronezh)

SHEBL S.M.,

Doctor of Science, Professor (Egypt)

SHLEGEL I.,

Candidate of Science (Engineering), OOO «INTA-Stroy» (Omsk)

SHTACKELBERG D.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Israel)

YAKOVLEV G.,

Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

YU JIANGMIAO,

PhD / Associate Professor (China, Guangzhou)

В.И. РИМШИН¹, д-р техн. наук (RimshinVI@mgsu.ru), П.С. ТРУНТОВ¹, бакалавр (pavel_truntov@mail.ru);
Е.С. КЕЦКО², магистр (kkuzzina@mail.ru); А.С. НАГУМАНОВА³, студент (alena.nagumanova@mail.ru)

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук
(127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева
(127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49)

Комплексный подход к контролю качества высокопрочного бетона в период эксплуатации

Характер поведения высокопрочных бетонов проявляется в процессе эксплуатации зданий. В связи с этим возникает вопрос о методике проведения контроля качества конструкций, выполненных из высокопрочного бетона. В представленной работе рассмотрены особенности поведения высокопрочного бетона в период эксплуатации. Рассмотрены характер поведения высокопрочного бетона, принцип градуировки приборов при контроле качества, варианты комплексного подхода по контролю качества высокопрочного бетона во время эксплуатации. В ходе исследования проанализированы различные методы контроля качества высокопрочного бетона в период эксплуатации, описаны варианты оптимальных сочетаний методов испытаний, обеспечивающих корректную градуировку, обозначено влияние усадочных трещин при контроле качества. Контроль качества высокопрочного бетона и конструкций из него необходимо производить путем комплексного использования разрушающих и неразрушающих методов. В свою очередь, усадочные трещины, образовавшиеся в период эксплуатации, не влияют на несущую способность конструкций из высокопрочных бетонов. Высокопрочные бетоны и конструкции из них обладают рядом специфических особенностей, которые дают о себе знать на разных этапах жизнедеятельности здания.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, контроль качества, методы контроля прочности бетона.

Для цитирования: Римшин В.И., Трунтов П.С., Кецко Е.С., Нагуманова А.С. Комплексный подход к контролю качества высокопрочного бетона в период эксплуатации // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 4–7.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-4-7>

V.I. RIMSHIN¹, Doctor of Sciences (Engineering) (RimshinVI@mgsu.ru), P.S. TRUNTOV¹, Bachelor (pavel_truntov@mail.ru);
E.S. KETSKO², Master (kkuzzina@mail.ru); A.S. NAGUMANOVA³, Student (alena.nagumanova@mail.ru)

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

² Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

³ Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev (49, Timiryazevskaya Street, Moscow, 127550, Russian Federation)

Comprehensive Approach to Quality Control of High-Strength Concrete During Operation

The behavior of high-strength concretes manifests itself in the operation of buildings. This raises the question how to conduct quality control of structures made of high-strength concrete. This work considers the features of behavior of high-strength concrete during operation. The nature of the behavior is considered in connection with the principle of calibration of devices when controlling the quality, options for a comprehensive approach to quality control of high-strength concrete during operation. In the course of the study, various methods of quality control of high-strength concrete during operation are analyzed, options for optimal combinations of test methods that ensure correct calibration are described, and the influence of shrinkage cracks when controlling the quality is indicated. Quality control of high-strength concrete and structures made of it must be carried out through the integrated use of destructive and non-destructive methods. In turn, shrinkage cracks formed during operation do not affect the bearing capacity of structures made of high-strength concretes. High-strength concretes and structures made of them have a number of specific features that make themselves felt at different stages of the building's life.

Keywords: high-strength concrete, quality control, methods for controlling the strength of concrete.

For citation: Rimshin V.I., Truntov P.S., Ketsko E.S., Nagumanova A.S. Comprehensive approach to quality control of high-strength concrete during operation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 4–7. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-4-7>

В связи с обновлением жилого фонда в строительном комплексе возрастает спрос на строительство высотных зданий с применением монолитных железобетонных несущих конструкций. Высотные здания из-за большой этажности воспринимают высокие значения внутренних усилий, поэтому на смену сборным железобетонным конструкциям приходят конструкции, выполненные с применением высокопрочных бетонов. Если с бетоном более низких классов строительной практики уже достаточно, чтобы понимать принцип его поведения на различных стадиях жизненного цикла здания или сооружения, то с высоко-

прочным бетоном дела обстоят иначе. Характер поведения высокопрочных бетонов проявляется в процессе эксплуатации зданий. В связи с этим для высокопрочного бетона вводятся дополнительные требования, которые описаны в ГОСТ 31914–2012 «Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций», но с учетом особенностей контроля прочности бетона при эксплуатации, а также практики технического обследования зданий с применением высокопрочного бетона стоит обратить внимание на методику проведения испытаний по контролю прочности высокопрочного бетона

в период эксплуатации. Именно в этот период раскрывается характер поведения высокопрочных бетонов, который связан с повышенной экзотермией, высоким модулем упругости, повышенным армированием, а также характером армирования. В связи с этим возникает вопрос о методике проведения контроля качества конструкций, выполненных из высокопрочного бетона, а именно как учесть влияние, оказываемое на конструкции в период эксплуатации, и как с достаточной точностью определить фактический класс бетона.

В работе [1] представлено, что фактическая прочность высокопрочного бетона в уже эксплуатируемом объекте может быть ниже прочности контрольных образцов, которые были отобраны в процессе возведения здания. Как правило, это связано с повышенным содержанием арматуры в конструкции, а также характером ее армирования.

Отдельно остановимся на контроле качества высокопрочного бетона в каждой конструкции в период эксплуатации здания при возрасте бетона более одного года.

После длительной эксплуатации построение градуировочной зависимости для используемых приборов необходимо выполнять, используя результаты предварительных испытаний в точках с максимальными, средними и минимальными показателями прочности бетона. Также необходимо учитывать условия, в которых эксплуатировался объект, а именно влажность, степень агрессивности среды [2–6].

В настоящее время градуировку приборов неразрушающего контроля косвенными методами принято выполнять с использованием метода местных разрушений, таких как отрыв со скалыванием или скалывание ребра.

Также необходимо отметить, что изменение условий испытания, как правило, приводит к изменению основных зависимостей, на которых основаны неразрушающие методы контроля качества бетона [6–9].

Материалы и методы

Основная практика по контролю качества высокопрочных бетонов приобретена в процессе возведения и эксплуатации монолитных конструкций высотных (уникальных) зданий, имеющих повышенный уровень ответственности. В период технического обследования строительных конструкций из высокопрочного бетона на этапе эксплуатации была обнаружена особенность высокопрочного бетона, а именно возможность образования усадочных трещин. Данные трещины, как правило, образуются из-за повышенной экзотермии на фоне собственной усадки, а также от обезвоживания. С помощью ультразвукового метода и прямых испытаний кернов установлено, что минимальная глубина трещин составляет более 50% толщины плиты, в остальных случаях трещины сквозные. Ширина раскрытия трещин варьируется в двух диапазонах: от 0,1 до 0,3 мм и от 0,3 до 0,4 мм. Первый диапазон по ширине раскрытия является допустимым. Второй диапазон по ширине раскрытия не влияет на несущую способность, но может повлиять на долговечность конструкции. Для дальнейшей безопасной и надежной эксплуатации здания рекомендуется выполнить затирку усадочных трещин, глубина которых менее 50% толщины конструкции и ширина раскрытия до 0,3 мм, ремонтным составом, а для сквозных трещин шириной раскрытия от 0,3 до 0,4 мм выполнить инъецирование при помощи эпоксидного состава [9–15].

В свою очередь, усадочные трещины накладывают дополнительные ограничения на применимость мето-

Исходные данные для построения градуировочной зависимости партии
The source data for the construction of the calibration dependence of the party

Скорость ультразвука, м/с	Прочность, МПа			$ R_{иН}-R_{иФ} /S$	
	По результатам испытаний	По градуировочной зависимости		До отбраковки	После отбраковки
		До отбраковки	После отбраковки		
3884	72,81	69,21	69,81	1,213	1,763
4046	75,28	73,62	74,39	0,558	0,525
3628	64,21	62,2	62,54	0,678	0,984
3631	60,97	62,29	62,63	0,444	0,976
3804	72,24	70,13	70,76	0,713	0,87
3716	62,94	64,6	65,03	0,559	1,228
4035	73,23	73,32	74,08	0,033	0,5
3892	71,98	69,41	70,02	0,863	1,148
4145	76,53	76,33	77,2	0,066	0,393
3803	66,64	66,98	67,5	0,114	0,502
4120	76,48	75,64	76,48	0,282	0,001
3946	62,28	70,89	–	2,9	–
3946	64,93	64,82	65,26	0,035	0,196
4030	71,31	73,2	73,95	0,638	1,553
4011	73,5	72,67	73,4	0,28	0,059

дов контроля и определения прочности бетона в виде затрудненного выбора участка без трещин, имеющего необходимый размер для конкретного метода измерения. Также особенности высокопрочного бетона приводят к тому, что фактическая прочность бетона может быть ниже прочности контрольных образцов, изготовленных в процессе возведения, а прочность бетона, определенная неразрушающими методами в поверхностных зонах конструкций, может быть ниже прочности в глубинных зонах. Вследствие этого встает вопрос об использовании комплексного подхода для получения более достоверных результатов контроля и определения прочности высокопрочного бетона. Данный подход основывается на сочетании разрушающих и неразрушающих методов.

В рамках исследования было рассмотрено многофункциональное административное здание с подземной автостоянкой, расположенное в Москве. Здание имеет повышенный уровень ответственности и состоит из двух частей – стилобата и башни. Эксплуатация здания по назначению осуществляется с 2015 г.

Отбор кернов на рассматриваемом объекте производился с помощью буровой установки Hilti D200. Для сверления отверстий использовалось алмазное кольцевое сверло, которое закреплялось на сверлильной установке. Высверленный керн извлекался из забоя после окончания сверления. Глубина сверления до 400 мм, диаметр отверстий – 100 мм.

Комплексный подход к контролю качества бетона заключается в том, что на каждой контролируемой конструкции проводится предварительное испытание бетона поверхностного слоя косвенными неразрушающими методами. Далее из числа участков, на которых производились измерения, отбирается не менее 12 значений, которые соответствуют минимальным, максимальным и близким к средним показаниям прибора контроля косвенным неразрушающим методом. На каждом участке определяется прочность бетона разрушающим методом путем прямых испытаний кернов, отобранных из конструкций, или методом отрыва со скалыванием.

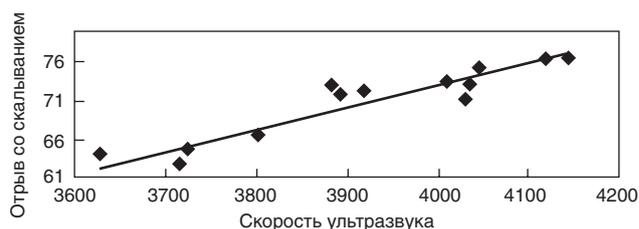
Результаты исследования

Результаты испытаний для построения градуировочной зависимости контролируемой партии представлены в таблице.

Полученные данные сопоставляются путем построения градуировочных зависимостей. Пример построенной градуировочной зависимости представлен на рисунке. Представленная градуировочная зависимость описывается уравнением линейного вида:

Список литературы

- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Киселева Ю.А. Особенности системы контроля качества высокопрочных бетонов // *Строительные материалы*. 2012. № 2. С. 63–67.
- Несветаев Г.В., Коллеганов А.В., Коллеганов Н.А. Особенности неразрушающего контроля прочности



Градуировочная зависимость для проектного класса бетона по прочности B60–B65
Calibration dependence for the design class of concrete for strength B60–B65

$$y=0,0284x-40,337.$$

По результатам расчета коэффициент вариации меньше 15%, а коэффициент корреляции больше 0,7, следовательно, данная градуировочная зависимость может использоваться для определения фактической прочности бетона в пределах значений ультразвука, в которых она была построена.

Для бетона класса B60 оптимальным сочетанием методов испытаний, обеспечивающих корректную градуировку, является сочетание косвенного метода ударного импульса с применением склерометров с энергией удара не менее 0,2 Дж и прямого метода испытания контрольных образцов, или испытания кернов, взятых из конструкции, или отрыва со скалыванием. А для бетонов классов B80, B90 будет рационально сочетание косвенного метода ударного импульса с применением склерометров с энергией удара более 2 Дж и прямого метода испытания кернов из конструкций.

Выводы

Высокопрочные бетоны и конструкции из них обладают рядом специфических особенностей (высокий модуль упругости, хрупкость, повышенная экзотермия, собственная усадка и усадка от обезвоживания, повышенное содержание арматуры и характер армирования конструкций), что существенно усложняет процесс контроля качества и прочности высокопрочного бетона и конструкций из него.

Усадочные трещины, образовавшиеся в период эксплуатации, не влияют на несущую способность конструкций из высокопрочных бетонов и устраняются путем затирки их ремонтным составом или инъецирования эпоксидным составом.

Контроль качества высокопрочного бетона и конструкций из него необходимо производить путем комплексного использования разрушающих и неразрушающих методов, что обеспечит более корректную градуировку и позволит более точно определить фактический класс бетона.

References

- Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kiseleva Yu.A. Peculiarities of system of control of high-strength concretes quality. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 2, pp. 63–67. (In Russian).
- Nesvetaev G.V., Kolleganov A.V., Kolleganov N.A. Features of non-destructive testing of concrete strength of

- бетона эксплуатируемых железобетонных конструкций // *Интернет-журнал Науковедение*. 2017. Т. 9. № 2.
3. Несветаев Г.В. Перспективы использования метода ультразвукового прозвучивания при обследовании и проектировании усиления железобетонных конструкций // *Безопасность труда в промышленности*. 2008. № 2. С. 62–66.
 4. Римшин В.И., Курбатов В.Л., Король Е.А., Кузина Е.С., Саттаров С.А. К вопросу остаточного ресурса железобетонных конструкций при поперечном изгибе по прочности нормальных сечений // *Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы – 2019. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции*. Москва. 25 ноября 2019 г. С. 440–444.
 5. Varlamov A., Rimshin V., Tverskoi S. A method for assessing the stress-strain state of reinforced concrete structures // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 91. 02046.
 6. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Strength of short concrete filled steel tube columns of annular cross section // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. Part 1. 022062.
 7. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafeva M.A. Deformability of a volume-compressed concrete // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. Part 1. 022063.
 8. Kuzina E., Rimshin V., Kurbatov V. The reliability of building structures against power and environmental degradation effects // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Electronic edition. Vol. 463. Part 3. 042009.
 9. Римшин В.И., Гаврилов В.Б., Варламов А.А. Оценка механических и макроструктурных характеристик бетона методом локального разрушения // *Бюллетень строительной техники*. 2018. № 12 (1012). С. 24–26.
 10. Varlamov A.A., Rimshin V.I., Tverskoi S.Y. Durability of buildings in urban environment // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931 MSF, pp. 340–345.
 11. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. Прочность центрально-сжатых трубобетонных элементов усовершенствованной конструкции // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 3 (77). С. 12–21.
 12. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Strength of short concrete filled steel tube columns of annular cross section // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 022062.
 13. Валевиц Д.М., Гаврилова Н.Г., Римшин В.И. К вопросу подтверждения физико-механических свойств бетона в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов // *Университетская наука*. 2018. № 1 (5). С. 41–43.
 14. Римшин В.И., Варламов А.А. Объемные модели упругого поведения композита. // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2018. № 3 (375). С. 63–68.
 15. Kuzina E., Rimshin V. Strengthening of concrete beams with the use of carbon fiber // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 983, pp. 911–919.
 - operated reinforced concrete structures. *Internet-Journal Naukovedenie*. 2017. Vol. 9. No. 2. (In Russian).
 3. Nesvetaev G.V. Prospects for the use of the ultrasonic sounding method in the examination and design of reinforced concrete structures. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2008. No. 2, pp. 62–66. (In Russian).
 4. Rimshin V.I., Kurbatov V.L., King E.A., Kuzina E.S., Sattarov S.A. To the question of the residual resource of reinforced concrete structures during transverse bending by the strength of normal sections. *Construction system engineering. Cyber-physical building systems – 2019. Collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Moscow. November 25, 2019, pp. 440–444. (In Russian).
 5. Varlamov A., Rimshin V., Tverskoi S. A method for assessing the stress-strain state of reinforced concrete structures. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 91. 02046.
 6. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Strength of short concrete filled steel tube columns of annular cross section. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. Part 1. 022062.
 7. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafeva M.A. Deformability of a volume-compressed concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. Part 1. 022063.
 8. Kuzina E., Rimshin V., Kurbatov V. The reliability of building structures against power and environmental degradation effects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Electronic edition. Vol. 463. Part 3. 042009.
 9. Rimshin V.I., Gavrilov V.B., Varlamov A.A. Assessment of the mechanical and macrostructural characteristics of concrete by local fracture. *Byulleten' stroitel'noi tekhniki*. 2018. No. 12 (1012), pp. 24–26. (In Russian).
 10. Varlamov A.A., Rimshin V.I., Tverskoi S.Y. Durability of buildings in urban environment. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931 MSF, pp. 340–345.
 11. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafieva M.A. Strength of centrally compressed pipe-concrete elements of advanced design. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No. 3 (77), pp. 12–21. (In Russian).
 12. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Strength of short concrete filled steel tube columns of annular cross section. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 022062.
 13. Valevich D.M., Gavrilova N.G., Rimshin V.I. On the issue of confirming the physicomaterial properties of concrete under the influence of various operational factors. *Universitetskaya nauka*. 2018. No. 1 (5), pp. 41–43. (In Russian).
 14. Rimshin V.I., Varlamov A.A. Volumetric models of the elastic behavior of the composite. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2018. No. 3 (375), pp. 63–68. (In Russian).
 15. Kuzina E., Rimshin V. Strengthening of concrete beams with the use of carbon fiber. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 983, pp. 911–919.

Д.А. СЕНИЦИН, канд. техн. наук (d4013438@yandex.ru), А.С. САЛОВ, канд. техн. наук (salov@list.ru), И.Г. ТЕРЕХОВ, канд. техн. наук (iv_98_04@mail.ru), А.А. ТИМОФЕЕВ

Уфимский государственный нефтяной технический университет (450080, г. Уфа, ул. Менделеева, 195)

Высокоэффективные бетоны нового поколения при строительстве зданий повышенной этажности в Республике Башкортостан

Представлены результаты экспериментальных исследований по получению высокопрочных тяжелых бетонов (класса по прочности при сжатии В60 и выше) с использованием сырьевых материалов Республики Башкортостан, а также практический опыт применения бетонов повышенной прочности (классов по прочности при сжатии В45–В55) и высокопрочных бетонов. Перспектива применения таких бетонов связана с тем, что если в настоящее время максимальная высота гражданских зданий в Уфе составляет 99,9 м, то в ближайшие годы планируется строительство нескольких зданий повышенной этажности (42–50 этажей, высота более 100 м) с несущим железобетонным монолитным каркасом. Результаты испытаний образцов тяжелого бетона класса по прочности при сжатии В60 показывают возможность его изготовления как на габбродиоритовом (из изверженных пород), так и на известняковом (из осадочных пород) щебне, при этом прочность образцов бетона, изготовленного с использованием габбродиоритового щебня, в среднем на 10 МПа выше прочности бетона аналогичного состава на известняковом щебне. Разрушение образцов высокопрочного тяжелого бетона на известняковом щебне происходит преимущественно по самим зернам щебня, разрушение образцов бетона на габбродиоритовом щебне происходит по цементному камню или по границе цементный камень – заполнитель.

Ключевые слова: высококачественные бетоны, высокопрочный бетон, органоминеральные модификаторы, фракционный состав, железобетонные конструкции.

Для цитирования: Синицин Д.А., Салов А.С., Терехов И.Г., Тимофеев А.А. Высокоэффективные бетоны нового поколения при строительстве зданий повышенной этажности в Республике Башкортостан // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 8–12. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-8-12>

D.A. SINITSIN, Candidate of Sciences (Engineering) (d4013438@yandex.ru), A.S. SALOV, Candidate of Sciences (Engineering) (salov@list.ru), I.G. TEREKHOV, Candidate of Sciences (Engineering) (salov@list.ru); A.A. TIMOFEEV
Ufa State Petroleum Technological University (195, Mendeleeva Street, Ufa, 450062, Russian Federation)

Highly Efficient New Generation Concretes in the Construction of High-Rise Buildings in the Republic of Bashkortostan

The results of experimental studies on the production of high-strength heavy concretes (compression strength class B60 and higher) using raw materials of the Republic of Bashkortostan, as well as practical experience in the use of increased strength concretes (compression strength class B45–B55) and high-strength concretes are presented. The prospect of using such concretes is associated with the fact that if the current maximum height of civil buildings in Ufa is 99.9 m, then in the coming years it is planned to build several high-rise buildings (42–50 floors, height of more than 100 m) with a bearing reinforced concrete monolithic frame. The results of tests of samples of heavy concrete of the B60 compressive strength class show the possibility of its production from both gabbrodiorite (from igneous rocks) and limestone (from sedimentary rocks) rubble, while the strength of concrete samples made using gabbrodiorite rubble is on average 10 MPa higher than the strength of concrete of a similar composition on limestone rubble. The destruction of samples of high-strength heavy concrete on limestone rubble occurs mainly on the crushed stone grains themselves, the destruction of concrete samples on gabbrodiorite rubble occurs on the cement stone or along the cement stone – aggregate border.

Keywords: high-quality concrete, modifiers, fractional composition, reinforced concrete structures, dosing of components.

For citation: Sinitsin D.A., Salov A.S., Terexhov I.G., Timofeev A.A. Highly efficient new generation concretes in the construction of high-rise buildings in the Republic of Bashkortostan. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 8–12. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-8-12>

В мировой строительной практике высококачественные бетоны (High Performance Concrete) известны с 80-х гг. XX в. В России начало массового производства высокопрочных бетонов было связано с появлением на отечественном строительном рынке органоминеральных модификаторов серии «МБ», которые были разработаны Научно-исследовательским институтом бетона и железобетона» (НИИЖБ) совместно с ООО «Мастер-Бетон [1, 2]. Достоинства данных модификаторов позволили за короткий срок организовать массовое производство бетонов высокой прочности, низкой проницаемости, повышенной коррозионной стойкости и морозостойкости.

Наиболее значимыми объектами, при строительстве которых были использованы высокопрочные бетоны с модификаторами серии «МБ», являются, безусловно, высотные здания на ММДЦ «Москва-Сити» [3, 4]. В последние годы ряд высотных объектов в городах России были построены из высокопрочного бетона, полученного с использованием других супер- и гиперпластификаторов и микронаполнителей, которые зарекомендовали себя с наилучшей стороны [5, 6]. Если в крупнейших мегаполисах России (Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург) уже накоплен определенный опыт применения высокопрочных модифицированных бетонов для высотного

строительства, то строительный комплекс Республики Башкортостан только осваивает технологию их изготовления и применения.

В Республике Башкортостан до недавнего времени строились в основном каркасно-монолитные жилые дома высотой до 25 этажей (до 75 м); исключение составляет здание банка «Уралсиб», построенное турецкими строителями в 2000–2001 гг. В 2016–2018 гг. ГК «Жилстройинвест» был возведен многофункциональный жилищно-деловой комплекс «СМАРТ-ПАРК-УФА», одно из зданий которого «Идель-Таур» имеет высоту 34 этажа (три подземных и один надземный) и высоту 99,9 м. В микрорайоне «Планета» ЗАО ФСК «Архстройинвестиции» в 2017–2018 гг. возведен монолитный каркас жилого дома высотой 30 этажей. В 2018 г. ГК «Жилстройинвест» начато строительство жилого комплекса «Символ», одно из зданий которого будет также иметь высоту 99,9 м. В ближайшие годы в г. Уфа намечается строительство еще ряда зданий повышенной этажности (42–50 этажей) с несущим монолитным железобетонным каркасом. Очевидно, что решение задач высотного домостроения невозможно без использования бетонов повышенной прочности (В35–В55) и высокопрочных бетонов (В60 и выше).

Как известно, качество возводимых железобетонных конструкций зависит от стабильности качества заполнителей и портландцемента, от стабильности технологии производства бетонных смесей и технологии выполнения бетонных работ на строительной площадке. Технология получения высокопрочных бетонов имеет следующие отличительные особенности:

- низкое содержание воды затворения (низкое В/Ц), за счет чего достигается максимальное снижение пористости и уплотнение структуры цементного камня, повышение плотности за счет снижения объема воздушных пор [7];

- применение тонкомолотых наполнителей с высокой прочностью с целью снижения пористости, повышения плотности и улучшения однородности структуры бетона [8];

- высокая точность дозирования компонентов, постоянный контроль влажности заполнителей, использование смесителей с высокой интенсивностью смешивания [9];

- минимизация дефектов структуры за счет оптимального фракционного состава заполнителей, тщательного перемешивания и уплотнения бетонной смеси [10, 11];

- обеспечение низкого тепловыделения при гидратации для массивных конструкций с целью предотвращения деформаций структуры бетона;

- обязательный уход за бетоном в первые 7 сут.

В составах бетонных смесей классов по прочности при сжатии В60, В80 и В90, разработанных С.С. Каприеловым с коллегами для строительства ММДЦ «Москва-Сити» [3, 4], использовались органоминеральные модификаторы бетона серии МБ, в состав которых входит суперпластифицирующая добавка, микрокремнезем и зола-уноса в определенных пропорциях. В качестве крупного заполнителя применялся щебень гранитный марки по дробимости 1400, широко используемый в строительной индустрии г. Москвы.

Для оценки возможности получения высокопрочных бетонов на сырьевых материалах Республики Башкортостан был проведен лабораторный подбор составов бетона класса по прочности при сжатии В60 марки по подвижности П5 (осадка конуса 21–25 см). В качестве исходных компонентов для изготовления бетонной смеси были использованы следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ I 52,5 (производства Филиала ООО «Хайдельберг ЦементРус», г. Стерлитамак);

- известняковый щебень с Миньярского карьера фракции 5–20 мм (вариант крупного заполнителя № 1, марка по дробимости 1200);

- габбродиоритовый щебень с Сангалыкского карьера фракции 5–15 мм (вариант крупного заполнителя № 2, марка по дробимости 1400);

- природный песок с модулем крупности 2,7–2,9 (относится к группе «крупных» песков), непрерывным зерновым составом (т. е. представлены все фракции) и содержанием илистых и глинистых частиц 1,8%;

- тонкомолотый известняковый наполнитель в виде минерального порошка неактивированного МП1 по ГОСТ Р 52129–2003;

- микрокремнезем;

- суперпластифицирующая добавка на основе поликарбоксилатов.

Таблица 1
Table 1

Результаты испытаний лабораторных составов тяжелого бетона класса по прочности В60
Test results of laboratory compositions of heavy concrete of class B60 strength

Расход материалов на 1 м ³ бетона, кг								Осадка конуса, см	Плотность бетона, кг/м ³	Прочность контрольных образцов, кгс/см ²		
ПЦ	Щебень	Песок	Микрокремнезем	ТМЗ	Пластификатор	Вода	В/Ц			через 3 сут н.т.	через 7 сут н.т.	через 28 сут н.т.
500	1090 (изв.)	700	30	50	5	140	0,28	21	2495	674	742	825
530	1070 (изв.)	720	50	–	6,3	142	0,27	21	2500	653	730	806
500	1090 (гр.)	700	30	50	5	140	0,28	21	2520	735	830	931
530	1070 (гр.)	720	50	–	6,3	142	0,27	21	2520	720	816	917



Рис. 1. Образцы-кубы тяжелого бетона класса по прочности при сжатии В60 после испытания: *a* – образец бетона на известняковом щебне, трещины проходят в том числе по зернам щебня; *b* – образец бетона на гранитном щебне, трещины проходят по цементному камню

Fig. 1. Samples-cubes of heavy concrete class compressive strength В60 after testing: *a* – concrete sample on limestone crushed stone, cracks pass, including along the grains of crushed stone; *b* – concrete sample on crushed granite; cracks pass along the cement stone



Рис. 3. Здание «Идель-Тауэр»: завершается возведение монолитного каркаса (лето 2017 г.)

Fig. 3. The “Idel-Tower” building is completing the construction of a monolithic frame (Summer, 2017)

При подборе состава высокопрочного бетона класса по прочности при сжатии В60 контролировались следующие показатели бетонной смеси и затвердевшего бетона: плотность бетонной смеси, подвижность (по осадке конуса), жизнеспособность, прочность контрольных образцов 10×10×10 см через 3, 7, 28 сут нормального твердения, плотность затвердевших образцов.

Результаты лабораторных испытаний составов высокопрочного бетона класса В60 представлены в табл. 1.

Подвижность бетонной смеси (по осадке конуса) соответствовала марке по удобоукладываемости П5. Жизнеспособность бетонной смеси (при периодическом перемешивании) составила не менее 2 ч.

Результаты испытаний показали, что все четыре подобранных состава бетонной смеси, отличающиеся по расходу цемента и виду крупного заполнителя, в проектном возрасте 28 сут обеспечивают получение бетона класса по прочности В60 (М800) (рис. 1). При этом установлены следующие закономерности:

- прочность образцов тяжелого бетона, изготовленного с использованием габбродиоритового щебня, примерно на 9,8 МПа выше прочности бетона аналогичного состава на известняковом щебне;

- разрушение контрольных образцов, изготовленных с использованием известнякового щебня, происходит по самим зернам щебня;

- разрушение контрольных образцов, изготовленных с использованием габбродиоритового щебня, происходит по цементному камню или по границе цементный камень – заполнитель;

- подобранные составы бетона класса по прочности при сжатии В60 характеризуются ускоренным



Рис. 2. Здание «Идель-Тауэр». Построено три надземных этажа (сентябрь 2016 г.)
Fig. 2. The “Idel-Tower” building. Three elevated floors were built (September, 2016)

Результаты испытаний опытно-промышленной партии бетона В60
Test results of a pilot batch of concrete В60

Место отбора пробы бетонной смеси и изготовления образцов	Плотность затвердевшего бетона, кг/м ³	Прочность при сжатии образцов, кгс/см ²		
		через 4 сут н.т.	через 7 сут н.т.	через 28 сут н.т.
Образцы изготовлены на РБУ ООО «СБТ»	2526	612	736	828
Образцы изготовлены на строительной площадке «4 Сезона»	2506	–	706	840

набором прочности. Прочность при сжатии образцов в возрасте 3 сут составляла 80% от 28-суточной, а в возрасте 7 сут – 90% от 28-суточной. Это объясняется высокой удельной поверхностью используемого портландцемента ЦЕМ I 52,5 Н;

- увеличение расхода цемента свыше 500 кг/м³ не приводит к дальнейшему росту прочности бетона и является нежелательным с точки зрения его экзотермии (тепловыделения).

После завершения лабораторных экспериментов 30 марта 2015 г. на РБУ ООО «Современные бетонные технологии» была изготовлена опытная партия бетонной смеси класса по прочности В60 (М800), которая была отгружена на объект «Многофункциональный жилой комплекс в Орджоникидзевском районе ГО г. Уфа («4 сезона»)» и уложена в две колонны секции 1А. В качестве рабочего был принят состав на габбродиоритовом щебне с расходом цемента 500 кг/м³. Жизнеспособность бетонной смеси (при начальной марке по удобоукладываемости П5) составила не менее 1,5 ч. Из партии бетонной смеси на РБУ ООО «Современные бетонные технологии» и строительной площадке были изготовлены партии образцов-кубов, которые затем были испытаны в возрасте 4, 7 и 28 сут, результаты испытаний приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, значение прочности при сжатии, требуемой для класса В60 (М800), было достигнуто в проектном возрасте 28 сут, прочность в возрасте 7 сут составляла 90% от проектной прочности. Таким образом, проведенными лабораторными исследованиями и производственными испытаниями доказана возможность получения высокопрочного тяжелого бетона класса по прочности при сжатии

Таблица 2
Table 2

B60 (M800) на сырьевых материалах Республики Башкортостан.

Опыт массового применения высокопрочных бетонов в Республике Башкортостан для возведения каркасно-монолитных зданий в настоящее время отсутствует. Для массового строительства зданий высотой до 25 этажей используются в основном бетоны классов В25, В30 и В35, которые являются наиболее рациональными для зданий такой этажности [12].

Вертикальные конструкции семи нижних этажей монолитного каркаса 34-этажного здания «Идель-Тауэр» (рис. 2) впервые в Уфе были запроектированы из тяжелого бетона класса по прочности при сжатии В45. Для изготовления бетонной смеси были использованы стандартные для Республики Башкортостан сырьевые материалы, а именно: портландцемент ЦЕМ I 52,5 (Филиал ООО «ХайдельбергЦемент Рус», г. Стерлитамак); известняковый щебень с Миньярского карьера фракции 5–20 мм (марка по дробимости 1200); природный песок с модулем крупности 2,5–2,8; суперпластифицирующая добавка на основе поликарбоксилатов Master Glenium; наполнитель в виде минерального порошка неактивированного МП1 из карбонатных пород по ГОСТ Р 52129–2003 с Миньярского карьера. Бетонирование конструкций было выполнено в июле–сентябре 2016 г. Снятие опалубки производилось через 3 сут после бетонирования, после чего выполнялся уход за бетоном: конструкции обильно увлажнялись, оборачивались мешковиной и полиэтиленовой пленкой. В результате прочность бетона всех конструк-

ций в возрасте 28 сут соответствовала проектным значениям.

Вышележащие этажи здания (с 4-го по 31-й) запроектированы и выполнены из тяжелого бетона класса по прочности при сжатии В35, что также является первым в Республике Башкортостан опытом массового применения бетона такого класса. На стадии строительства производился контроль прочности бетона в соответствии с ГОСТ 18105–2010 путем изготовления на строительной площадке и испытания в лаборатории контрольных образцов бетона, а также путем испытаний всего количества конструкций неразрушающим методом.

Возведение монолитного каркаса здания «Идель-Тауэр» (рис. 3) было полностью завершено в сентябре 2017 г., продолжительность строительства составила 14 мес, что составляет 2,4 этажа в месяц. Прочность бетона всех монолитных конструкций в возрасте 28 сут соответствовала проектным значениям, что позволило своевременно перейти к возведению наружных стен и внутренних перегородок.

Полученный при возведении здания «Идель-Тауэр» опыт подтверждает практическую возможность и целесообразность применения бетонов классов по прочности при сжатии В35–В45 в строительстве зданий повышенной этажности в Уфе. Очевидно, что с увеличением этажности строительства в ближайшие 5–10 лет начнут внедряться в практику строительства и высокопрочные бетоны, к выпуску которых бетонные заводы и строительные лаборатории Уфы уже вполне готовы.

Список литературы

- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Ферджулян А.Г. и др. Опыт применения высокопрочных бетонов // *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2002. № 8. С. 33–37.
- Житкевич Р.К., Лазопуло Л.Л., Шейнфельд А.В. и др. Опыт применения высокопрочных модифицированных бетонов на объектах ЗАО «Моспромстрой» // *Бетон и железобетон*. 2005. № 2. С. 2–8.
- Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И. и др. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити» // *Строительные материалы*. 2006. № 10. С. 13–17.
- Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Киселева Ю.А. и др. Опыт возведения уникальных конструкций из модифицированных бетонов на строительстве комплекса «Федерация» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2006. № 8. С. 20–22.
- Батяновский Э.И., Якимович В.Д. Особенности технологии высокопрочного бетона, формирования свойств и использование комплексной химической добавки // *Технологии бетонов*. 2014. № 8. С. 53–55.

References

- Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Ferdzhulyan A.G. et al. Experience in the use of high-strength concrete. *Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve*. 2002. No. 8, pp. 33–37. (In Russian).
- Zhitkevich R.K., Lazopulo L.L., Sheinfeld A.V. et al. Experience of using high-strength modified concrete at the facilities of Mospromstroy. *Beton i zhelezobeton*. 2005. No. 2, pp. 2–8. (In Russian).
- Kapriyelov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I. et al. Modified concrete of a new generation in the structures of the Moscow-City MIBC. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 10, pp. 13–17. (In Russian).
- Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Kiseleva Yu.A. et al. Experience in the construction of unique structures of modified concrete at the construction of the Federation complex. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2006. No. 8, pp. 20–22. (In Russian).
- Batyanovsky E.I., Yakimovich V.D. Features of high-strength concrete technology, formation of properties and the use of complex chemical additives. *Tekhnologii betonov*. 2014. No. 8, pp. 53–55. (In Russian).
- Baranov I.M., Yusupov R.K., Tarasov A.S., Soldatova N.I. Realities and prospects of increasing the strength of extra-strong concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 11, pp. 50–53. (In Russian).

6. Баранов И.М., Юсупов Р.К., Тарасов А.С., Солдатова Н.И. Реальности и перспективы повышения прочности особопрочных бетонов. *Строительные материалы*. 2013. № 11. С. 50–53.
7. Соловьева В.А., Степанова И.В. и др. Проектирование высокопрочного бетона с улучшенными физико-механическими характеристиками. *Бетон и железобетон*. 2007. № 3. С. 16–18.
8. Юай Юань, Ван Лин, Тянь Пе. Высококачественный цементный бетон с улучшенными свойствами. М.: АСВ, 2014. 448 с.
9. Krot A.Yu., Ryazanova V.A., Gabitov A.I., Salov A.S., Rolnik L.Z. Resource-saving technologies for advanced concrete in the Republic of Bashkortostan // *MATEC Web of Conferences. 7th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Transbud-2018)*. 2018. Vol. 230 Art. num. No. 3009. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823003009>
10. Бедов А.И., Знаменский В.В., Габитов А.И. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. Ч. I. Обследование и оценка технического состояния оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. М.: АСВ, 2014. 705 с.
11. Бедов А.И., Габитов А.И., Знаменский В.В. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. М.: АСВ, 2017. 924 с.
12. Bedov A.I., Salov A.S., Gabitov A.I. CAD in interdisciplinary integration as a tool to increase specialist training quality in "Construction" education. *VI International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education" (IPICSE-2018)*. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825102011>
7. Solovyova V.A., Stepanova I.V. et al. Designing high-strength concrete with improved physical and mechanical characteristics. *Beton i zhelezobeton*. 2007. No. 3, pp. 16–18. (In Russian).
8. Yuai Yuan, Wang Lin, Tian Pe. Vysokokachestvennyy tsementobeton s uluchshennymi svoystvami [High-quality cement concrete with improved properties]. Moscow: ASV. 2014. 448 p.
9. Krot A.Yu., Ryazanova V.A., Gabitov A.I., Salov A.S., Rolnik L.Z. Resource-saving technologies for advanced concrete in the Republic of Bashkortostan. *MATEC Web of Conferences. 7th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Transbud-2018)*. 2018. Vol. 230 Art. num. No. 3009. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823003009>
10. Bedov A.I., Gabitov A.I., Znamensky V.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya, vosstanovlenie i usilenie osnovanii i stroitel'nykh konstruksii ekspluatiruemykh zdaniy i sooruzhenii. Chast' I. Obsledovanie i otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya osnovanii i stroitel'nykh konstruksii ekspluatiruemykh zdaniy i sooruzhenii [Assessment of the technical condition, restoration and strengthening of foundations and building structures of operated buildings and structures. Part I. Inspection and assessment of the technical condition of foundations and building structures of operated buildings and structures]. Moscow: ASV. 2014. 705 p.
11. Bedov A.I., Gabitov A.I., Znamensky V.V. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya, vosstanovlenie i usilenie osnovanii i stroitel'nykh konstruksii ekspluatiruemykh zdaniy i sooruzhenii [Assessment of the technical condition, restoration and strengthening of the foundations and building structures of operated buildings and structures]. Moscow: ASV. 2017. 924 p.
12. Bedov A.I., Salov A.S., Gabitov A.I. CAD in interdisciplinary integration as a tool to increase specialist training quality in "Construction" education. *VI International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education" (IPICSE-2018)*. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825102011>

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Технология гипсовых отделочных материалов и изделий

Федулов А.А., М: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ», 2018. 240 с.

В книге описано производство гипсовых отделочных материалов и изделий от добычи сырья до упаковки готовой продукции. Особое внимание автор уделяет подробному описанию технологических линий и отдельных единиц оборудования, установленных на передовых предприятиях гипсовой промышленности. В книге представлено большое количество иллюстраций всех технологических переделов, которые помогут глубже представить и понять технологические процессы производства того или иного изделия. Описание технологии каждого вида гипсовых изделий основывается на существующих производственных регламентах предприятий России, Германии и Дании, включая шахты, карьеры, которые автор посещал лично.

Книга предназначена студентам, изучающим производство строительных материалов и конструкций в качестве дополнительного материала по технологии современных гипсовых изделий, а также для инженеров-технологов заводов, производящих гипсовую продукцию в качестве справочного материала.

Заказать литературу можно через редакцию, направив заявку по e-mail: mail@rifsm.ru, или оформить заказ на сайте www.rifsm.ru



УДК 666.98

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-13-17>

Г.А. МОИСЕЕНКО, ведущий инженер (gecklock@yandex.ru)

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

Изменение призмочной прочности и модуля упругости высокопрочного сталефибробетона и его матрицы в зависимости от возраста

При возведении уникальных, в том числе высотных сооружений, в условиях повышения массивности монолитных конструкций особенно актуальным становится применение высокопрочных бетонов. Мелкозернистые высокопрочные бетоны, обладающие микропористой структурой с минимальным количеством дефектов, имеют ряд положительных качеств и открывают широкие перспективы для монолитного строительства. Основным недостатком таких бетонов является их повышенная хрупкость. Один из путей снижения негативного влияния этого фактора – введение в состав дисперсной армирующей стальной фибры. В связи с этим высокопрочный сталефибробетон в последнее время вызывает все больший научный и практический интерес. Однако его широкое применение ограничивается отсутствием полноценной нормативной базы и недостаточной изученностью свойств данного материала. В данной работе представлена теоретическая обработка результатов экспериментальных исследований основных физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона – призмочной прочности и модуля упругости при кратковременном сжатии. Исследуется бетон из отечественных компонентов с содержанием стальной фибры на нижнем пороге эффективности – 1,5 мас. %. Для сравнения параллельно исследуются аналогичные характеристики матрицы – мелкозернистого высокопрочного бетона без добавления фибры. В результате теоретической обработки экспериментальных данных откорректированы зависимости, описывающие изменение указанных характеристик в зависимости от возраста.

Ключевые слова: высокопрочный сталефибробетон, мелкозернистый высокопрочный бетон, физико-механические свойства бетона, призмочная прочность, модуль упругости, дисперсное армирование.

Для цитирования: Моисеенко Г.А. Изменение призмочной прочности и модуля упругости высокопрочного сталефибробетона и его матрицы в зависимости от возраста // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-13-17>

G.A. MOISEENKO, Leading Engineer (gecklock@yandex.ru)

Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

Changes in the Prismatic Strength and Elastic Modulus of High-Strength Steel Fiber Concrete and its Matrix Depending on the Age

When constructing unique, including high-rise, structures under the conditions of increasing massiveness of monolithic structures, the use of high-strength concrete becomes especially relevant. Fine-grained high-strength concretes that have a micro-porous structure with a minimum number of defects have a number of positive qualities and open up wide prospects for monolithic construction. The main disadvantage of such concretes is their increased fragility. One of the ways to reduce the negative impact of this factor is the introduction of dispersed reinforcing with steel fiber. In this regard, high-strength steel fiber concrete has recently attracted increasing scientific and practical interest. However, its wide application is limited by the lack of a full regulatory framework and insufficient knowledge of the properties of this material. This paper presents a theoretical treatment of the results of experimental studies of the main physical and mechanical properties of high-strength steel-fiber concrete: prismatic strength and elastic modulus under short-term compression. Concrete prepared from domestic components with steel fiber content at the lower efficiency threshold of 1.5 wt. % is studied. For comparison, similar characteristics of the matrix – fine-grained high-strength concrete without the addition of fiber – are studied in parallel. As a result of theoretical processing of experimental data, the dependencies describing the change in these characteristics depending on the age were corrected.

Keywords: high-strength steel fiber concrete, fine-grained high-strength concrete, physical and mechanical properties of concrete, prismatic strength, modulus of elasticity, dispersed reinforcement.

For citation: Moiseenko G.A. Changes in the prismatic strength and elastic modulus of high-strength steel fiber concrete and its matrix depending on the age. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 13–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-13-17>

Стремительное развитие строительной отрасли, а также современные тенденции в строительстве, направленные на возведение уникальных, в том числе высотных зданий и сооружений, диктуют необходимость усовершенствования и разработки новых видов применяемых строительных материалов. Для возведения монолитных высотных сооружений особенно актуальным является применение высоко-

прочных бетонов, позволяющих сократить массивность и материалоемкость конструкций. Однако при всех своих достоинствах мелкозернистые высокопрочные бетоны (МВБ) имеют и ряд недостатков, основные из которых – повышенная хрупкость и низкая пластичность. Одним из путей решения этой проблемы является введение в состав бетона дисперсного армирования в виде стальной фибры.

Таблица 1
Table 1

Экспериментальные данные и результаты вычисления значений призмной прочности для МВБ
Experimental data and results of calculating prismatic strength values for fine-grained high-strength concrete

Возраст t , сут	$R_b(t)$ эксп., МПа	$R_b(t)$ по формулам 1, 1*, МПа	$R_b(t)$ по формулам 2, 2*, МПа
7	80,3	81,9	82,25
28	102,7	102,7	102,5
100	104,7	106,2	106,87
240	108,9	107,17	109,6

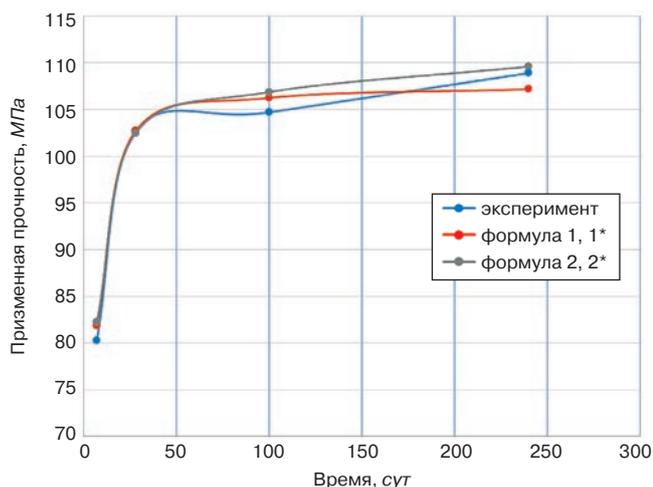


Рис. 1. Изменение призмной прочности в зависимости от возраста МВБ
Fig. 1. The change in prismatic strength depending on the age of fine-grained high-strength concrete

Дисперсно-армированный высокопрочный бетон в последнее время вызывает все больший интерес, однако его широкое применение сдерживается недостаточной изученностью его свойств, как при кратковременном, так и при длительном нагружении [1, 2]. Исследованием свойств высокопрочного сталефибробетона (ВСФБ) при различных воздействиях занимаются как в России [3, 4], так и за рубежом [5–7]. В нашей стране, в частности, проводились исследования высокопрочного сталефибробетона с повышенным содержанием стальной фибры [8–10]. В задачи данной статьи входит описание физико-механических свойств ВСФБ при минимальном рациональном проценте дисперсного армирования в сравнении с неармированным мелкозернистым высокопрочным бетоном (МВБ) при кратковременном нагружении сжимающей нагрузкой в зависимости от возраста бетона.

Методика исследования

Были использованы результаты масштабных экспериментальных исследований [11], направленных на изучение широкого спектра физико-механических и реологических свойств ВСФБ в сравнении с его матрицей – МВБ. Для исследования характери-

Таблица 2
Table 2

Экспериментальные данные и результаты вычисления значений призмной прочности для ВСФБ
Experimental data and results of calculating prismatic strength values for high-strength steel fiber concrete

Возраст t , сут	$R_b(t)$ эксп., МПа	$R_b(t)$ по формуле 1, МПа	$R_b(t)$ по формуле 2, МПа
7	87,2	90,24	89,3
28	111,5	111,5	111,3
100	117,3	119,83	118,23
240	122,8	122,01	119,95

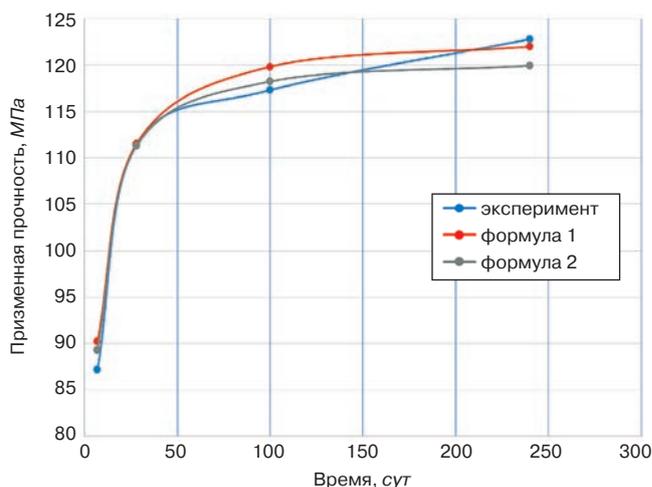


Рис. 2. Изменение призмной прочности в зависимости от возраста ВСФБ
Fig. 2. The change in prismatic strength depending on the age of high-strength steel fiber concrete

стик при кратковременном нагружении было изготовлено две серии призм – первая изготавливалась без фибры, а во вторую вводилась прямая стальная латунированная фибра диаметром 0,3 мм, длиной 13 мм в количестве 1,5 мас. %. Согласно результатам [11], такое содержание является своего рода нижним порогом эффективности дисперсного армирования. Состав матрицы назначался в соответствии с [12–14] и принимался следующий:

- портландцемент марки ПЦ 500 ДОН – 900 кг/м³;
- суперпластификатор МБЗ-50К – 360 кг/м³;
- песок с $M_k = 2,5 - 860$ кг/м³;
- вода – 190 кг/м³.

Составы бетонов можно отнести к самоуплотняющимся, поскольку расплыв конуса составляет более 60 см. Испытания образцов обеих серий проводились согласно программе исследований в возрасте 7, 28, 100 и 240 сут. При испытаниях учитывались требования ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона».

Результаты испытаний и их теоретическая обработка

Проведенные эксперименты показали, что набор прочности как МВБ, так и ВСФБ происходит стре-

Таблица 3
Table 3

Экспериментальные данные и результаты вычисления значений модуля упругости для МВБ
Experimental data and results of calculating elastic modulus values for fine-grained high-strength concrete

Возраст t , сут	$E_b(t)$ эксп., МПа	$E_b(t)$ по формулам 3, 3*, МПа	$E_b(t)$ по формулам 4, 4*, МПа
7	30800	31318,92	30853,25
28	38200	38200	38167,31
100	38400	39085,08	39107,38
240	39000	39309,32	39332,18

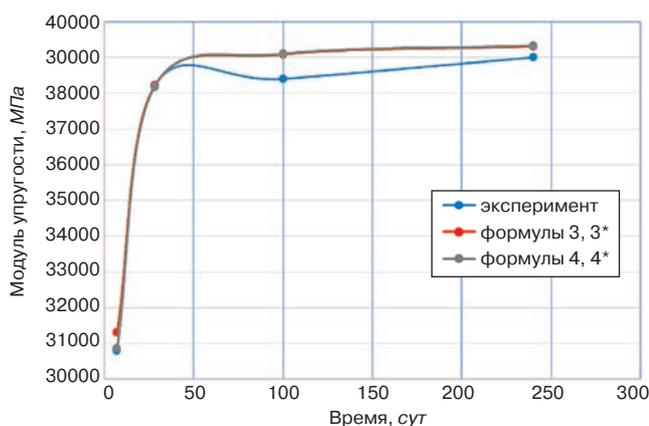


Рис. 3. Изменение модуля упругости МВБ в зависимости от возраста
Fig. 3. The change in elastic modulus depending on the age of fine-grained high-strength concrete

нительно в первые дни твердения (до 7 сут), достигая 78% от 28-сут прочности. После 28 сут кривая набора призмочной прочности выходит на плавное возрастание, у ВСФБ несколько более активное, чем у МВБ. Для теоретического описания кривой набора прочности исследуемых составов в привязке к 28-суточной прочности используем модифицированную формулу Е.Н. Шербакова:

$$R_b(t) = R_b(28) \left[1 + \frac{23}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right], \quad (1)$$

где $R_b(t)$ – призмочная прочность бетона при сжатии в возрасте t , МПа; $R_b(28)$ – призмочная прочность бетона при сжатии в возрасте 28 сут, МПа; B – условный класс бетона по прочности при сжатии, принимаемый равным $1,4R_b(28)$, МПа; t – возраст бетона, сут.

Для ВСФБ формула (1) дает хорошую сходимость с экспериментальными данными. Характер набора прочности МВБ после 28 сут твердения требует корректировки данного выражения. Предлагается разбить кривую набора прочности МВБ на два участка – до 28 сут и после 28 сут. Выражение (1) примет вид:
– при $t \leq 28$ сут

$$R_b(t) = R_b(28) \left[1 + \frac{23}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right];$$

Таблица 4
Table 4

Экспериментальные данные и результаты вычисления значений модуля упругости для ВСФБ
Experimental data and results of calculating elastic modulus values for high-strength steel fiber concrete

Возраст t , сут	$E_b(t)$ эксп., МПа	$E_b(t)$ по формулам 3, 3**, МПа	$E_b(t)$ по формулам 4, 4**, МПа
7	37500	37466,92	37459,5
28	43100	43100	43063,1
100	44300	44041,77	44123,77
240	44000	44280,81	44377,41

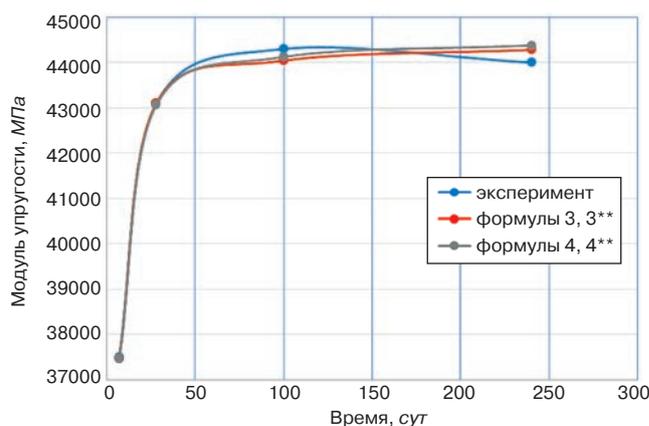


Рис. 4. Изменение модуля упругости ВСФБ в зависимости от возраста
Fig. 4. The change in elastic modulus depending on the age of high-strength steel fiber concrete

– при $t > 28$ сут

$$R_b(t) = R_b(28) \left[1 + \frac{10}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right], \quad (1^*)$$

Также была проведена проверка возможности применения формулы, предложенной для ВСФБ с высоким содержанием фибры в работе [10]:

$$R_b(t) = R_b(28) \frac{t}{2,3+0,92t}. \quad (2)$$

Сопоставление с экспериментальными данными дало подобную картину: для ВСФБ формула показывает хорошую сходимость, а для МВБ требует корректировки. Подобным образом, разбивая ось времени на два участка, приходим к выражению:

– при $t \leq 28$ сут

$$R_b(t) = R_b(28) \frac{t}{2,3+0,92t};$$

– при $t > 28$ сут

$$R_b(t) = R_b(28) \frac{t}{4,1+0,92t}. \quad (2^*)$$

Результаты экспериментальных исследований и вычисления призмочной прочности по предлагаемым формулам представлены в табл. 1, 2. Результаты сопоставления теоретических и экспериментальных данных представлены на рис. 1, 2.

Модуль упругости также стремительно возрастает в раннем возрасте МВБ и ВСФБ, а после 28 сут твердения практически не изменяется. Для теоретического описания изменения модуля упругости в зависимости от возраста бетона в привязке к значению в 28 сут воспользуемся формулами, предложенными в [10]:

$$E_b(t) = E_b(28) \left[1 + \frac{23}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right]^{0,3}; \quad (3)$$

$$E_b(t) = E_b(28) \left(\frac{t}{2,3+0,92t} \right)^{0,4}, \quad (4)$$

где $E_b(t)$ – модуль упругости бетона в возрасте t , МПа; $E_b(28)$ – модуль упругости бетона в возрасте 28 сут, МПа; t – возраст бетона, сут.

Сопоставление с экспериментальными данными показало, что для исследуемых составов обе представленные зависимости неудовлетворительно работают при $t < 28$ сут. Откорректируем их, разбив временную ось на два отрезка – до 28 сут и после 28 сут. Для МВБ формулы (3), (4) примут вид:

– при $t < 28$ сут

$$E_b(t) = E_b(28) \left[1 + \frac{55}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right]^{0,3}; \quad (3^*)$$

$$E_b(t) = E_b(28) \left(\frac{t}{55+0,92t} \right)^{0,4}; \quad (4^*)$$

– при $t \geq 28$ сут

$$E_b(t) = E_b(28) \left[1 + \frac{23}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right]^{0,3};$$

$$E_b(t) = E_b(28) \left(\frac{t}{2,3+0,92t} \right)^{0,4}.$$

Для ВСФБ формулы (3), (4) примут вид:

– при $t < 28$ сут

$$E_b(t) = E_b(28) \left[1 + \frac{45}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right]^{0,3}, \quad (3^{**})$$

Список литературы

1. Beddar M. Fiber reinforced concrete: past, present and future. *Настоящее и будущее фибробетона. Бетон и железобетон – пути развития. Научные труды 2-й Всероссийской (международной) конференции по бетону и железобетону. Т. 3. Секционные доклады, секция Технологии бетонов.* 5–9 октября 2005 г. Москва. С. 228–234.
2. Войлоков И.А. Фибробетон – история вопроса, нормативная база, проблемы и решения // *ALITInform международное аналитическое обозрение.* 2009. № 2. С. 44–53.
3. Korsun V., Vatin N., Franchi A., Korsun A., Crespi P., Mashtaler S. The strength and strain of high-strength concrete elements with confinement and steel fiber reinforcement including the conditions of the effect of

$$E_b(t) = E_b(28) \left(\frac{t}{3,5+0,92t} \right)^{0,4}; \quad (4^{**})$$

– при $t \geq 28$ сут

$$E_b(t) = E_b(28) \left[1 + \frac{23}{55+B} \cdot \left(\frac{t-28}{t+5} \right) \right]^{0,3};$$

$$E_b(t) = E_b(28) \left(\frac{t}{2,3+0,92t} \right)^{0,4}.$$

Результаты экспериментальных исследований и вычисления модуля упругости представлены в табл. 3, 4. Результаты сопоставления экспериментальных и теоретических данных при вычислении модуля упругости для МВБ и ВСФБ представлены на рис. 3, 4.

Выводы

По результатам представленного исследования можно сделать следующие выводы:

- представлены результаты проведенных испытаний по определению кратковременных физико-механических свойств ВСФБ с содержанием фибры 1,5 мас. % в сравнении с матрицей;
- в результате исследований установлено, что введение указанного количества дисперсного армирования повышает призмную прочность и модуль упругости в среднем на 10% по сравнению с неармированной матрицей;
- откорректированы существующие зависимости по описанию изменения указанных характеристик в привязке к эталонным значениям в возрасте 28 сут применительно к новым исследуемым составам;
- предложенные формулы дают хорошую сходимость с экспериментальными данными и могут использоваться в практике проектирования и расчета конструкций;
- в качестве возможного направления дальнейших исследований можно предложить развитие полученных зависимостей для составов с различным содержанием стальной фибры.

References

1. Beddar M. Fiber reinforced concrete: past, present and future. *The present and future of fiber-reinforced concrete. Concrete and reinforced concrete are development paths. Scientific works of the 2nd All-Russian (international) conference on concrete and reinforced concrete. Vol. 3. Section reports, section Concrete technology.* October 5–9, 2005. Moscow, pp. 228–234.
2. Voilokov I.A. Fiber-concrete – history, regulatory framework, problems and solutions. *ALITInform International Analytical Review.* 2009. No. 2, pp. 44–53. (In Russian).
3. Korsun V., Vatin N., Franchi A., Korsun A., Crespi P., Mashtaler S. The strength and strain of high-strength concrete elements with confinement and steel fiber reinforcement including the conditions of the effect of

- elevated temperatures // *International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities, SPbUCEME, 2015. Procedia Engineering*. 2015. No. 117, pp. 975–984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.192>
4. Машталер С.Н., Корсун В.И. Влияние кратковременного нагрева на прочность и деформации высокопрочного сталефибробетона при осевом сжатии и растяжении. *Сборник тезисов докладов по материалам конференции «Научно-технические достижения студентов, аспирантов, молодых ученых строительной-архитектурной отрасли»*. Makeevka, 2016. 142 с.
 5. Abbas S., Nehdi M. L., Saleem M. A. Ultra-high performance concrete: mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2016. Vol. 10. No. 3, pp. 271–295.
 6. Gu C., Ye G., Sun W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives // *Science China Technological Sciences*. 2015. Vol. 58. Iss. 4, pp. 587–599. DOI: 10.1007/s11431-015-5769-4
 7. Aitcin P.C. High-performance concrete. London: E&FN SPON, 1998. 591 p.
 8. Мишина А.В. Исследование деформаций ползучести высокопрочного сталефибробетона при разгрузке // *Academia. Архитектура и строительство*. 2013. № 3. С. 111–113.
 9. Мишина А. В., Безгодов И. М., Андрианов А. А. Прогнозирование предельных деформаций ползучести сверхвысокопрочного сталефибробетона // *Вестник МГСУ*. 2012. № 12. С. 66–70.
 10. Карпенко Н.И., Травуш В.И., Каприелов С.С., Мишина А.В., Андрианов А.А., Безгодов И.М. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона // *Academia. Архитектура и строительство*. 2013. № 1. С. 106–113.
 11. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Петров А.Н., Безгодов И.М., Моисеенко Г.А., Степанов М.В., Чилин И.А. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочных сталефибробетонов из самоуплотняющихся смесей // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 г. Т. 2*. Москва. 2018. С. 237–246.
 12. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. М.: ООО «Типография Парадиз». 2010. 258 с.
 13. Каприелов С.С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // *Строительные материалы*. 2013. № 7. С. 28–30.
 14. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Дондуков В.Г. Модифицированные высокопрочные мелкозернистые бетоны с улучшенными деформативными характеристиками // *Бетон и железобетон*. 2006. № 2. С. 2–7.
 4. Mashtaler S.N., Korsun V.I. The effect of short-term heating on the strength and deformation of high-strength steel fiber reinforced concrete under axial compression and tension. *The collection of abstracts on the materials of the conference “Scientific and technological achievements of students, graduate students, young scientists of the construction and architectural industry”*. Makeevka, 2016. 142 p. (In Russian).
 5. Abbas S., Nehdi M. L., Saleem M. A. Ultra-high performance concrete: mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2016. Vol. 10. No. 3, pp. 271–295.
 6. Gu C., Ye G., Sun W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives. *Science China Technological Sciences*. 2015. Vol. 58. Iss. 4, pp. 587–599. DOI: 10.1007/s11431-015-5769-4
 7. Aitcin P.C. High-performance concrete. London: E&FN SPON, 1998. 591 p.
 8. Mishina A.V. The study of creep deformation of high-strength steel fiber reinforced concrete during unloading. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2013. No. 3, pp. 111–113. (In Russian).
 9. Mishina A.V., Bezgodov I.M., Andrianov A.A. Prediction of maximum creep strain of high performance steel fiber concrete. *Vestnik MGSU*. 2012. No. 12, pp. 66–70. (In Russian).
 10. Karpenko N.I., Travush V.I., Kapriyelov S.S., Mishina A.V., Andrianov A.A., Bezgodov I.M. Study of the physico-mechanical and rheological properties of high-strength steel fiber concrete. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2013. No. 1, pp. 106–113. (In Russian).
 11. Karpenko N.I., Kapriyelov S.S., Petrov A.N., Bezgodov I.M., Moiseenko G.A., Stepanov M.V., Chilin I.A. The study of the physico-mechanical and rheological properties of high-strength steel fiber concrete from self-compacting mixtures. *Basic, exploratory and applied research of RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2017*. Moscow. 2018. Vol. 2, pp. 237–246. (In Russian).
 12. Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S. Novyye modifitsirovannyye betony [New modified concrete]. Moscow: Printing House Paradise LLC. 2010. 258 p.
 13. Kapriyelov S.S., Chilin I.A. Ultra-high-strength self-compacting fibrous concrete for monolithic structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 7, pp. 28–30. (In Russian).
 14. Kapriyelov S.S., Sheynfel'd A.V., Kardumyan G.S., Dondukov V.G. Modified high-strength fine-grained concrete with improved deformation characteristics. *Beton i zhelezobeton*. 2006. No. 2, pp. 2–7. (In Russian).

К.В. ШУЛДЯКОВ, инженер (kirill-shuld@ya.ru), Б.Я. ТРОФИМОВ, д-р техн. наук (tbya@mail.ru), Л.Я. КРАМАР, д-р техн. наук (kramar-l@mail.ru)

Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет) (454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76)

Высокоморозостойкий бетон без воздухововлечения

Одним из традиционных способов повышения морозостойкости бетона является введение воздухововлекающих добавок, но такой подход наряду с увеличением плотности, расхода цемента и уменьшением В/Ц не позволяет получать высокофункциональные бетоны с маркой по морозостойкости F_{2450} и выше, что необходимо для суровых условий эксплуатации районов Арктики и Крайнего Севера. Были приняты способы обеспечения морозостойкости исходя из представления о механизме разрушения водонасыщенного бетона при циклическом замораживании и оттаивании за счет льдообразования в макрокапиллярах. Однако в этой концепции учитывается только поровое пространство цементного камня и остается без внимания его микроструктура. В литературе имеются сведения о получении морозостойкого бетона с В/Ц менее 0,3 без применения воздухововлекающих добавок. В данной статье рассматривается вопрос направленного формирования стойкой к циклическим воздействиям структуры цементного камня высокофункционального бетона. Было установлено, что при введении в бетонную смесь добавок суперпластификаторов и микрокремнезема за счет модификации гидратных фаз цементного камня возможно получение высокофункционального бетона с маркой по морозостойкости от F_{2300} до F_{2500} без специального воздухововлечения. Доказано, что марка по морозостойкости бетона зависит от генезиса применяемого суперпластификатора: поликарбоксилат одновременно проявляет пластифицирующие и модифицирующие свойства по сравнению с нафталинформальдегидом. Это проявляется в снижении количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне на ~2%, что способствует формированию гелеобразных низкоосновных гидратных фаз, более стойких к циклическим воздействиям. Кроме того, для высокофункциональных бетонов в процессе испытания на морозостойкость по третьему ускоренному методу в соответствии с ГОСТ 10060 была отмечена зависимость между характером насыщения 5% раствором NaCl и стабильностью структуры гидратных фаз цементного камня.

Ключевые слова: высокофункциональный бетон, морозостойкость, гидратные фазы, структура цементного камня, воздухововлечение.

Для цитирования: Шулдяков К.В., Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я. Высокоморозостойкий бетон без воздухововлечения // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-18-26>

K.V. SHULDYAKOV, Engineer (kirill-shuld@ya.ru), B.Ya. TROFIMOV, Doctor of Sciences (Engineering) (tbya@mail.ru), L.Ya. KRAMAR, Doctor of Sciences (Engineering) (kramar-l@mail.ru)
South Ural State University (National Research University) (76, Lenina Avenue, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation)

High-Frost-Resistant Concrete without air Entrainment

One of the traditional methods of increasing the frost resistance of concrete is the introduction of air-entraining additives, but this approach, along with increasing density, cement consumption and decreasing water-cement ratio, does not make it possible to obtain high performance concretes with mark on frost resistance F_{2450} and higher what is needed for the harsh operating conditions of the Arctic and the Far North. Methods were adopted to ensure the frost resistance based on the idea of the mechanism of destruction of water-saturated concrete during cyclic freezing and thawing due to ice formation in macro-capillaries. However, this concept takes into account only the pore space of the cement stone and ignores its microstructure. In the literature, there is information about the production of frost-resistant concrete with water-cement ratio less than 0.3 without the use of air-entraining additives. This article deals with the issue of directional formation of a highly functional concrete cement stone structure that is resistant to cyclical influences. It is established that when superplasticisers and microsilica additives are added to the concrete mix, it is possible to obtain high-functional concrete with a frost resistance rating from F_{2300} to F_{2500} without special air entrainment due to modification of the hydrate phases of the cement stone. It is proved that the grade of concrete frost resistance depends on the Genesis of the superplasticizer used: polycarboxylate simultaneously shows plasticizing and modifying properties, compared with naphthalene formaldehyde. This is manifested in a decrease in the amount of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the cement stone by ~2%, which contributes to the formation of gel-like low-basic hydrate phases that are more resistant to cyclic impacts. In addition, for high-functional concretes, the dependence between the nature of saturation with 5% NaCl solution and the stability of the structure of the hydrate phases of cement stone was noted in the process of testing for frost resistance by the third accelerated method in accordance with GOST 10060

Keywords: high performance concrete, freeze-thaw durability, hydrated phases, cement stone structure, air entrainment.

For citation: Shuldyaikov K.V., Trofimov B.Ya., Kramar L.Ya. High-frost-resistant concrete without air entrainment. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 18–26. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-18-26>

В настоящее время в строительную практику для возведения сборных и монолитных конструкций и сооружений внедряют высокофункциональный бетон (high performance concrete – НРС), под которым понимается бетон, получаемый из смеси с В/Ц не более 0,4 на качественных материалах с применением добавок модификаторов [1]. Такой бетон характеризуется прочностью при сжатии 50–120 МПа и позволяет снизить материалоемкость железобетонных кон-

струкций до 8–10 раз, что делает его экономически эффективным. НРС отличается высокой плотностью и водонепроницаемостью, низким водопоглощением и может применяться во всех средах эксплуатации согласно ГОСТ 31384–2017. Национальный стандарт предписывает ограничение по В/Ц не более 0,65–0,45 в зависимости от индекса среды эксплуатации, класс по прочности при сжатии не менее В25–45, по расходу цемента не менее 260–360 кг/м³.

В соответствии со Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации для обеспечения устойчивого развития региона необходимы новые материалы и технологии, устойчивые в суровых климатических условиях (СП 131.13330.2018) и при насыщении минерализованной водой. По ГОСТ 31384–2017 для работы железобетонных конструкций в условиях действия влаги и знакопеременной температуры бетон должен иметь марку по морозостойкости не менее F₂450.

Современные представления о механизме разрушения водонасыщенного бетона при циклическом замораживании и оттаивании за счет льдообразования в макрокапиллярных порах базируются на исследованиях американских ученых, опубликованных в середине XX в. [2–5]. Согласно исследованиям Т.С. Пауэрса и Т.Л. Брунаура в цементном камне с В/Ц=0,3 и ниже лед не образуется при охлаждении вплоть до -30°C, а при температуре до -50°C количество льда не превышает 25% от массы испаряемой воды в цементном камне с В/Ц не более 0,43 [6]. Следовательно, в этом случае лед в цементном камне появляется при замерзании воды в микрокапиллярах и механизм разрушения вследствие гидравлического давления не работает. По сравнению с образцами цементного камня льдистость при -30°C у образцов песчаного бетона увеличивается до 4–5 раз. Так как заполнителем является плотный кварцевый песок, такое увеличение льдистости главным образом является следствием дефектности контактной зоны цементного камня с песком. Зона контакта характеризуется высоким содержанием кристаллов портландита и улучшается за счет пуццоланизации [1, 7]. Низкая температура образования льда в высокофункциональном бетоне также позво-

ляет считать, что макрокапилляры в нем отсутствуют и в цементном камне не возникает гидравлическое давление, а в лед переходит вода микрокапилляров, следовательно, создания резервной пористости не требуется.

Исследования морозостойкости получаемых в настоящее время бетонов показали, что чаще всего марка по морозостойкости составляет F₂300 и не превышает F₂400 (табл. 1).

Из приведенных в табл. 1 данных следует, что при величине воздухоовлечения свыше 5,5% традиционными способами – повышением прочности бетона за счет снижения В/Ц, увеличением расхода цемента, варьированием дозировок воздухоовлекающей добавки и пластификатора – не достигается обеспечение сверхвысокой морозостойкости бетона, необходимой для суровых условий эксплуатации (≥F₂450). Воздухововлечение, вероятно, играет положительную роль на стадии охлаждения, при замораживании до -50°C, но эта роль невелика, и промораживание образцов с переходом в лед влаги микрокапилляров делает невозможным использование резервной пористости, так как вся капиллярная влага претерпевает фазовый переход и отсутствует гидравлическое давление. Следовательно, для повышения морозостойкости бетона до F₂500 и выше необходимо применение других способов, а не воздухоовлечения.

Известно, что цементный гель влияет на свойства бетона, в том числе и на его морозостойкость, но это, как правило, не учитывается на практике. В отечественных и зарубежных публикациях отмечается, что цементный гель является основным структурным компонентом цементного камня и бетона [6, 8]. Цементный гель – слабозакристаллизованный гидро-

Таблица 1
Table 1

Результаты испытаний морозостойкости бетона*
Results of concrete frost resistance tests

Вид добавки	Дозировка добавки, %	Расход цемента, кг	В/Ц В, л	ОК, см	ВВ, %	Прочность при сжатии, МПа,				Марка, F ₂
						Контрол. образцов	20 циклов	37 циклов	55 циклов	
Линамикс ПК	0,4	380	$\frac{0,34}{129}$	5	6,1	33,2	38,6	36,1	38,1	400
Полипласт Аэро	0,1									
Линамикс ПК	0,6	380	$\frac{0,34}{129}$	6	5,5	34,1	40,1	34,4	33,2	300
Полипласт Аэро	0,5									
Линамикс ПК	0,4	420	$\frac{0,32}{134}$	8	6,5	42	43,9	41,1	29,7	300
Полипласт Аэро	0,1									
Линамикс ПК	0,6	420	$\frac{0,32}{134}$	8	6	44,1	45,4	46,5	36,3	300
Полипласт Аэро	0,6									
Линамикс ПК	0,4	450	$\frac{0,31}{140}$	7	6,3	50,3	51,5	53,9	47,6	300
Полипласт Аэро	0,1									
Линамикс ПК	0,6	450	$\frac{0,31}{140}$	6	6,7	52,3	56,8	57,1	48,6	300
Полипласт Аэро	0,7									

Примечание. Результаты испытаний морозостойкости бетона по третьему ускоренному методу ГОСТ 10060–2012, приведенные в табл. 1, были любезно предоставлены авторам И.В. Вовк (фирма «Полипласт») на конференции 2017 г.

силикат кальция с отношениями $\text{CaO}/\text{SiO}_2=1,37-1,39$ и $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2\cong 1,5$ [9, 10]. Можно предположить, что гидросиликатный гель именно тот структурный компонент, который и влияет на морозостойкость НРС. Очевидной задачей технологии высокофункционального бетона является определение наличия цементного геля, его количества и стабильности в различных условиях эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций.

Вода в цементном камне может быть несвязанной в макрокапиллярах, замерзающей скачкообразно при температуре $-3-6^\circ\text{C}$, рыхлосвязанная в микрокапиллярах – замерзает при $-20-40^\circ\text{C}$ и прочно связанная адсорбционная влага, незамерзающая при глубоком охлаждении. Энергия связи прочно связанной влаги, адсорбированной при относительной влажности воздуха не более 0,8, превышает удельную теплоту льдообразования, поэтому такая влага не замерзает при температуре -180°C , т. е. в реальных условиях она не участвует в фазовых переходах [11].

Наши эксперименты по дилатометрии песчаного бетона после различного числа циклов замораживания выявили, что для образцов водного твердения с исходным $\text{В}/\text{Ц}=0,4-0,7$ при первом замораживании до -20°C не происходит объемных деформаций расширения при температуре $-3-6^\circ\text{C}$, характерных для льдообразования в макрокапиллярах [12]. Более того, в этом температурном интервале фиксируется объемная контракция, вызванная уменьшением объема адсорбционной влаги при охлаждении [13, 14]. После различного количества циклов замораживания и оттаивания (для образцов с $\text{В}/\text{Ц}=0,7$ через 20 циклов, а для образцов с $\text{В}/\text{Ц}=0,4$ и $0,5$ через 100 циклов) отмечаются разные по величине объемные деформации расширения, связанные с льдообразованием в макрокапиллярах. Таким образом, по данным дилатометрии можно выявить следующее:

- при первом замораживании определяют наличие макрокапилляров; если они отсутствуют, то по величине криогенной контракции можно оценить объем цементного геля;
- изменение структуры гидратных фаз цементного камня при циклическом замораживании, проявляющееся в кристаллизации цементного геля с увеличением объема, что связано с переходом гелевой пористости в макрокапиллярную и замерзанием в них воды с увеличением объема;
- определить сравнительную стабильность цементного геля в зависимости от $\text{В}/\text{Ц}$ или других факторов по числу циклических замораживаний до начала льдообразования в макрокапиллярах.

Нами проводились исследования морозостойкости песчаного бетона постоянного состава, но разных условий твердения [15]. Высокая морозостойкость образцов бетона нормального твердения при большой открытой макрокапиллярной пористости связана с существенным влиянием структурных особенностей гидратных фаз цементного камня на

стойкость бетона. Льдистость такого бетона минимальна, следовательно, гидратные фазы представлены главным образом гелевидной структурной составляющей с микропорами, вода в которых не замерзает при -18°C .

Пропаривание песчаного бетона вызывает снижение морозостойкости за счет увеличения объема открытых макрокапиллярных пор, что вызвано старением структуры (увеличением размеров кристаллов гидратных фаз) [16].

Льдистость образцов бетона автоклавного твердения ненамного превышает льдистость пропаренных образцов; величина открытой капиллярной пористости образцов бетона, прошедших запаривание, минимальна, но морозостойкость такого бетона самая низкая. Это вызвано тем, что продукты гидратации цементного камня автоклавного твердения имеют крупнокристаллическую структуру, кристаллизационные контакты имеют наибольшую хрупкость, а их создание сопровождается возникновением значительных напряжений. Образовавшаяся напряженная хрупкая структура характеризуется большой величиной концентрации напряжений в дефектных местах и не способна длительно сопротивляться циклическим воздействиям. Практически полное исчезновение гелевидной фазы в таких структурах снижает роль релаксационных явлений, уменьшает вязкость разрушения. Структура гидросиликатов кальция цементного камня может быть стабильной при нормальном твердении, что обеспечивает повышенную морозостойкость бетона без воздухоовлечения. При пропаривании и запаривании цементный гель кристаллизуется, при этом морозостойкость снижается до десяти раз и необходимо воздухоовлечение [17].

Таким образом, морозостойкость может снижаться как при нестабильной микроструктуре цементного геля, так и при повышенной закристаллизованности в условиях тепловлажностной обработки.

Старение цементного геля обнаруживается при всех условиях твердения бетона, механизм этого явления описан и сводится к следующему:

- накопление портландита в цементном камне повышает основность гидросиликатов кальция, а циклическое замораживание при -20°C и особенно при -50°C ускоряет этот процесс и приводит к росту кристаллов высокоосновных гидросиликатов, что сопровождается уменьшением количества цементного геля;
- дополнительное введение аморфного кремнезема снижает концентрацию извести, вызывает активную полимеризацию кремнекислородных тетраэдров и способствует формированию стабильных низкоосновных гидросиликатов кальция;
- снижение соотношения Ca/Si в гидросиликатах увеличивает степень их полимеризации, способствует увеличению количества и повышению стабильности гидросиликатного геля, что благоприятно влияет на свойства бетона [15].

Таблица 2
Table 2Фактический расход материалов на 1 м³ бетонной смеси
Actual material consumption per 1 m³ concrete mix

Модификатор	Цемент, кг	МК, кг	Пластификатор, кг	Вода, кг	Щебень, кг	Песок, кг	В/Ц	$\rho_{\text{теор}}$, кг/м ³
Без добавок*	637	–	–	198	906	662	0,31	2439
СП-1	446	–	4,46	138	1070	777		2478
СП-1+МК	463	37,1	4,63	144	1015	765		2469
АСЕ	424	–	4,33	131	1079	797		2484
АСЕ+МК	460	36,7	4,6	143	1024	764		2473

* Бездобавочный состав бетона получали в результате корректировки по подвижности и использовали для сравнения с модифицированными бетонами.

Таблица 3
Table 3Свойства бетонной смеси
Properties of concrete mix

Модификатор	$\rho_{\text{факт}}$, кг/м ³	$K_{\text{упл}}$	ОК, см	Расслаиваемость, %		Сохраняемость, мин	Однородность C_v , %
				Водоотделение	Раствороотделение		
Без добавок	2403	0,985	4±1	0,3±0,1	2,5	30	5±2
СП-1	2435	0,982	3±1	0,3±0,05	0,5	60	4±1
СП-1+МК	2429	0,984	2±1	0	0,2		2±2
АСЕ	2435	0,98	4±1	0,15±0,1	0,4		3±1
АСЕ+МК	2432	0,983	3±1	0	0,3		2±1

Таким образом, введение пуццолановой добавки в состав цементного камня бетона позволяет сохранить в нем цементный гель. Для выявления влияния совместного применения суперпластификатора и пуццоланы на морозостойкость НРС необходимо провести специальные исследования [7, 18].

Цель исследований – выявить влияние добавок модификаторов на морозостойкость высокофункционального бетона при -50°C в 5% растворе NaCl без специального воздухововлечения.

Материалы и методы исследования

Для изготовления высокофункционального бетона использовали цемент класса ЦЕМ I 42,5Н производства «Дюккерхофф Коркино цемент», удовлетворяющий требованиям ГОСТ Р 55224–2012 и ГОСТ 31108–2016.

В качестве крупного заполнителя использовали щебень Новосмолинского карьера фр. 10–20 и 5(3)–10 мм в соответствии с ГОСТ 8267–93. Мелкий заполнитель – песок кварцевый месторождения «Хлебороб» с $M_k=2,4$, отвечающий требованиям ГОСТ 8736–2014 для среднего песка I-го класса. Все заполнители промывали, высушивали и фракционировали для соответствия требованиям ГОСТ 26633–2015.

В качестве пластификатора использовали поликарбоксилат MasterGlenium ACE 430 (АСЕ) производства BASF в соответствии с СТО 70386662-310–2014. Для сравнения использовали наиболее распространенный нафталинформальдегидный суперпластификатор СП-1 производства ООО «Полипласт УралСиб», отвечающий требованиям ТУ 5870-005-58042865–05.

В качестве модификатора применяли активную минеральную добавку – микрокремнезем (МК), г. Новокузнецк, соответствующую ТУ 5743-048-02495332–96.

Морозостойкость бетона определяли по третьему ускоренному методу в соответствии с ГОСТ 10060–2012. Из бетонной смеси с маркой по удобоукладываемости П1 формовали образцы-кубы с ребром 10 см при коэффициенте уплотнения бетонной смеси не менее 0,98. Прочность образцов бетона оценивалась в соответствии с ГОСТ 10180–2012, водопоглощение – с ГОСТ 12730.3–78. Фазовый состав цементного камня определяли с применением рентгенофазового анализа и дериватографии.

Результаты исследований

Состав бетона с модифицирующими добавками рассчитывали по стандартной процедуре, методом абсолютных объемов, по ГОСТ 27006–86 (табл. 2). Все составы рассчитывали для бетона класса В60 при марке по удобоукладываемости П1.

В процессе приготовления бетонной смеси добавки дозировали и вводили селективно – сухой микрокремнезем смешивали с цементом, а пластифицирующие добавки – с водой затворения. Однородность бетонной смеси оценивалась по коэффициенту вариации прочности бетона, а также при определении содержания щебня в пробе бетонной смеси при испытании на раствороотделение. Результаты испытаний бетонной смеси приведены в табл. 3. По коэффициенту уплотнения и расслаиваемости бетонные смеси удовлетворяют требованиям ГОСТ 7473–2010 и СП 130.13330.2011.

Бетонные смеси после уплотнения содержат не более 2% вовлеченного воздуха, а с микрокремнеземом и пластифицирующими добавками формируются без водоотделения, качество их перемешивания позволяет получать высокую однородность массы, что приводит к низкому коэффициенту вариации прочности бетона.

Прочность бетона при сжатии и растяжении при изгибе приведена на рис. 1.

Зависимости прочности высокофункционального бетона при сжатии обычно устанавливают для 28 сут нормального твердения и учитывают влияние качества материалов, активность цемента и В/Ц или Ц/В фактор [1, 19]. В нашем случае все вышеперечисленные переменные параметры, влияющие на прочность бетона, стабилизированы, но прочностные характеристики изменяются. Отсюда можно сделать вывод, что различие связано с модифицированием микроструктуры гидратных фаз цементного камня НРС. Наибольшее увеличение прочности отмечается для образцов бетона с добавками АСЕ и МК и составляет около 30 МПа во все сроки твердения. Это вызвано как пуццолановой добавкой МК, так и комплексобразованием поликарбоксилатного суперпластификатора: ионы COO^- суперпластификатора взаимодействуют с Ca^{2+} портландцемента, что

способствует увеличению количества цементного геля и снижению содержания портландита [20].

Таким образом, введение в бетон добавок поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезема способствует формированию гелеобразной структуры цементного камня, что повышает его адгезионные свойства и прочность бетона на растяжение при изгибе. В возрасте 28 сут прочность бетона при изгибе без добавок составляет 5,7 МПа, а с добавками – более 8 МПа.

Добавка АСЕ более интенсивно по сравнению с СП-1 повышает прочности при изгибе и растяжении при раскалывании, что, вероятно, связано с понижением количества портландита за счет вовлечения в комплексобразование ионов кальция, характерное для поликарбоксилатов. Наибольшие значения прочности при изгибе и раскалывании образцов во все сроки твердения обеспечивает введение добавок АСЕ с МК.

Данные по водопоглощению бетонных образцов с различными добавками приведены на рис. 2.

Данные по водопоглощению позволяют сделать вывод, что открытая капиллярная пористость бетона, определяющая его долговечность, значительно снижается при комплексном модифицировании; со временем такой характер пористости сохраняется,

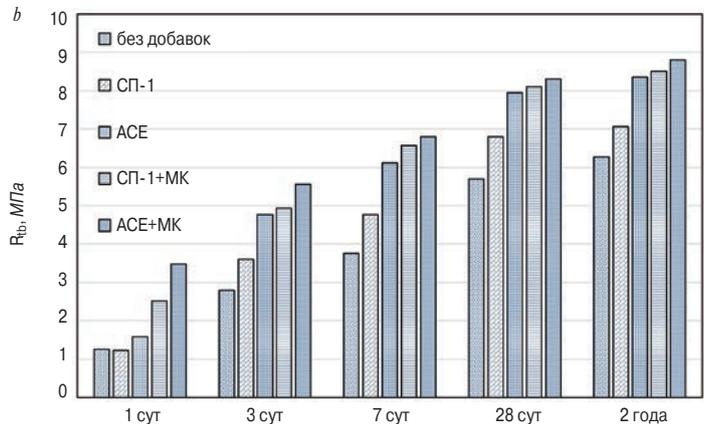
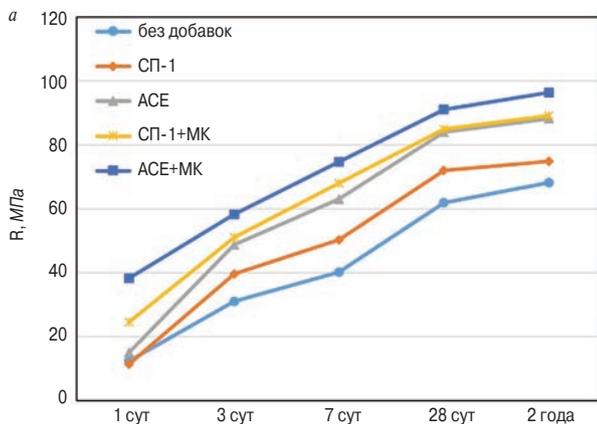


Рис. 1. Прочность высокофункционального бетона: а – при сжатии; б – растяжение при изгибе
Fig. 1. Strength of HPC: a – under compression; b – bending tension

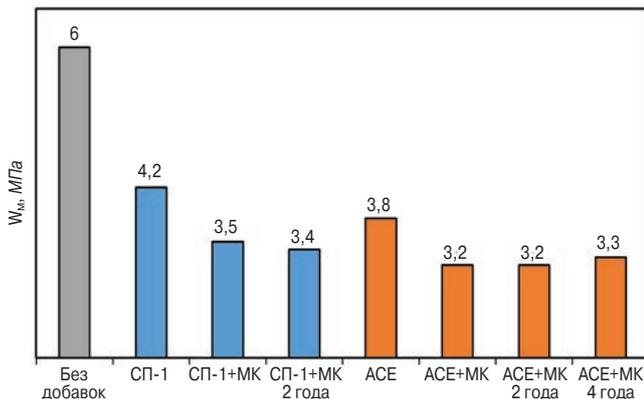


Рис. 2. Водопоглощение, мас. %, образцов НРС с различными модификаторами в 28 сут и более позднем возрасте
Fig. 2. Water absorption of samples of HPC with different modifiers at 28 days and later

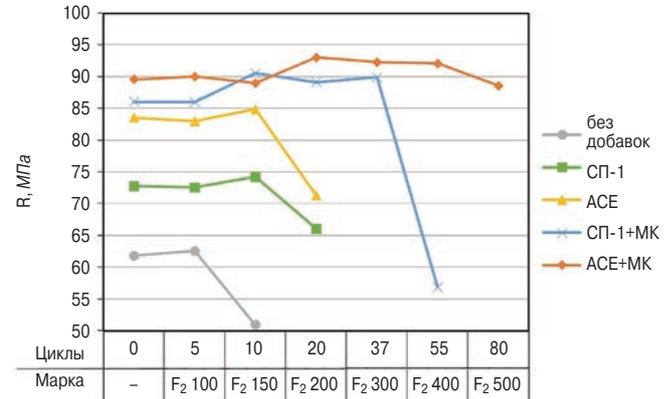


Рис. 3. Морозосолейстойкость образцов высокофункционального бетона
Fig. 3. Frost and salt resistance of samples of high-functional concrete

Таблица 4
Table 4

Снижение прочности основных образцов бетона при циклическом замораживании и оттаивании
Reduction of strength of basic concrete samples during cyclic freezing and thawing

Добавка	Без добавок	СП-1	АСЕ	СП-1+МК	АСЕ+МК
Количество циклов	10	20	55	80	
Контрольные образцы, %	100				
$\Delta R_{сж}, \%$	81	92	86	64	98
$\Delta R_{рп}, \%$	67	84	85	57	97

т. е. продукты гидратации формируют стабильные структурные элементы.

Для оценки стабильности и стойкости исследуемых НРС проводили испытания на морозостойкость по третьему ускоренному методу в соответствии с ГОСТ 10060–2012. Основные образцы испытывали сериями через число циклов, соответствующее F_{2100} – F_{2500} . Результаты испытаний образцов представлены на рис. 3.

Введение суперпластификатора СП-1 позволило повысить марку бетона по морозостойкости с F_{2100} (без добавок) до F_{2150} . Можно отметить, что проч-

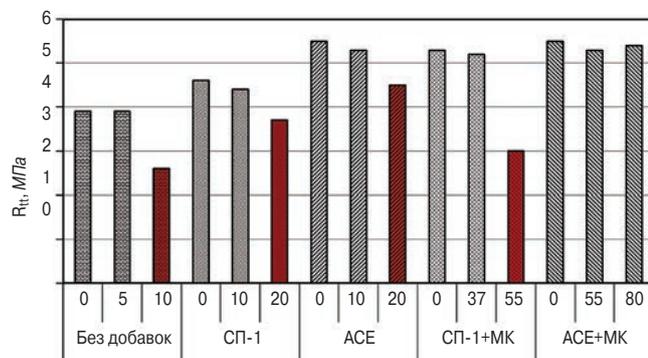


Рис. 4. Прочность при растяжении при раскалывании образцов после различного количества циклических замораживаний

Fig. 4. Tensile strength of the samples after different amounts of cyclic freezing

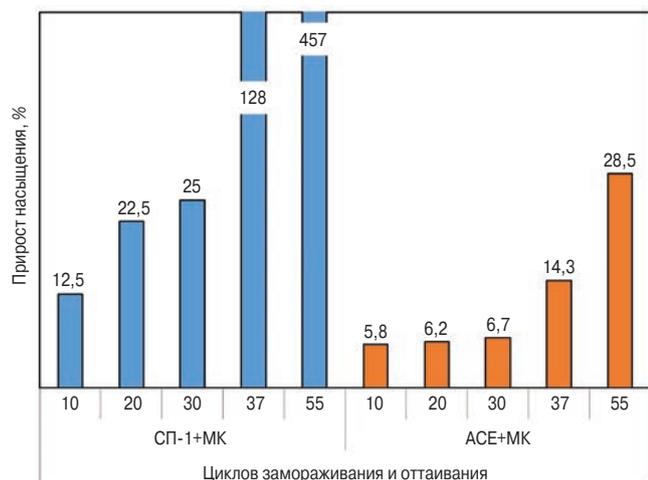


Рис. 5. Зависимость водопоглощения основных образцов от числа циклов замораживания и оттаивания

Fig. 5. Water absorption of main samples depending on the number of freezing and thawing cycles

ность основных образцов бетона до 10 циклов возрас- тала, что позволяет предположить недостаточную ста- бильность структуры гидратных фаз цементного кам- ня. На некоторых образцах бетона с СП-1 отмечалось шелушение поверхности с обнажением зерен запол- нителя после 20 циклов замораживания и оттаивания. Несмотря на большую эффективность добавки АСЕ, выражающуюся в повышении прочности бетона, его марка по морозостойкости не превышает F_{2150} . Только дополнительное введение пуццолановой до- бавки способствует повышению марки по морозо- стойкости бетона – в комплексе с СП-1 до F_{2300} , а в комплексе с АСЕ свыше F_{2500} , следовательно, пуццо- ланизация является эффективным способом повыше- ния морозостойкости бетона при постоянном В/Ц за счет формирования гелеобразных гидратных фаз по- вышенной стабильности. Можно предположить, что их повышенная стабильность также связана со спо- собностью АСЕ наряду с МК связывать гидроксид кальция в цементном камне и способствовать образо- ванию гелеобразных фаз, тем самым замедляя процес- сы старения структуры цементного камня.

Испытания на растяжение при раскалывании контрольных и основных образцов бетона, подверг- нутых различному количеству циклов заморажива- ния и оттаивания (рис. 4), подтвердили выявленные закономерности, полученные при испытании образ- цов на сжатие.

Закономерности изменения прочности на растя- жение при раскалывании подтвердили полученные ранее результаты по прочности при сжатии, что сви- детельствует о значительной роли пуццоланизации в достижении высокой морозостойкости НРС. Необходимо подчеркнуть, что при этом в бетонную смесь не вводились воздухововлекающие добавки, т. е. подтверждается принципиальная возможность получения высокой морозостойкости для бетонов без воздухововлечения, конструкции из которых мо- гут эксплуатироваться в суровых климатических ус- ловиях более 50 лет (ГОСТ 31384–2017).

Падение прочности образцов бетона на сжатие и растяжение при изгибе после соответствующего ко- личество циклов замораживания и оттаивания при- ведено в табл. 4.

Прочность на растяжение при раскалывании яв- ляется более чувствительным показателем деструк- ции бетона при циклическом замораживании. Образцы НРС с добавками СП-1 и МК не обеспечи- вают требуемой долговечности, поэтому, возможно, в данном случае необходимо применение воздухово- влекающих добавок.

Еще одним критерием морозостойкости является изменение массы образцов и наличие внешних де- фектов, таких как шелушение, околы граней и др., возникающих в процессе циклического заморажива- ния. В соответствии с ГОСТ 10060 допускается поте- ря массы основных образцов не более 2%. По данным изменения массы, в процессе проведения цикличес- ких испытаний на замораживание и оттаивание

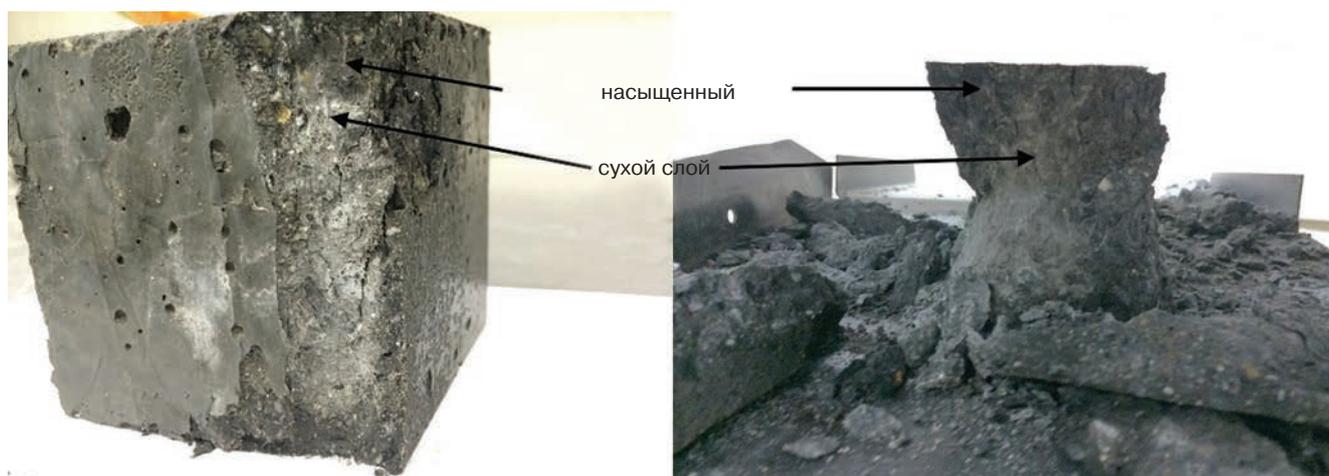


Рис. 6. Образцы высокофункционального бетона после 37 циклов замораживания и оттаивания
 Fig. 6. Water absorption of main samples depending on the number of freezing and thawing cycles

установлены следующие особенности полученных высокофункциональных бетонов:

- низкое водопоглощение контрольных и основных образцов бетона при стандартной процедуре насыщения солевым раствором из-за гелеобразной структуры и низкой проницаемости;

- увеличение массы образцов при циклическом замораживании и оттаивании вследствие дополнительного насыщения, характер которого меняется перед разрушением (рис. 5).

При насыщении контрольных и основных образцов бетона приращение массы первоначально одинаково и только для образцов с СП-1+МК через 37 циклов отмечается резкое (более чем в пять раз) увеличение прироста массы за счет «старения» цементного геля, так как прочность при сжатии и растяжении при изгибе в это время практически не изменилась. Следовательно, водопоглощение при циклическом замораживании является более чувствительным критерием деструкции первоначальной микроструктуры цементного камня по сравнению с прочностными характеристиками. Т. е. в этом случае появилась капиллярная пористость вследствие кристаллизации гелевидных фаз. Образовавшаяся капиллярная пористость увеличивает содержание льда при охлаждении, формируются макрокапиллярные поры, и в этот момент наличие резервной пористости вследствие воздуховлечения могло бы оказать положительную роль в повышении морозостойкости. После 55 циклов водопоглощение увеличивается еще в три раза из-за льдообразования в макрокапиллярах, появившихся вследствие деструкции, что подтверждается падением прочностных характеристик в процессе испытания бетона на морозостойкость (табл. 4).

Еще одной отличительной чертой высокофункциональных бетонов является самовысушивание вследствие недостаточного первоначального насыщения, а также связывания воды в результате дальнейшей гидратации. Самовысушивание наблюдается после различного числа циклов при испытании образцов на морозостойкость, после которых образует-

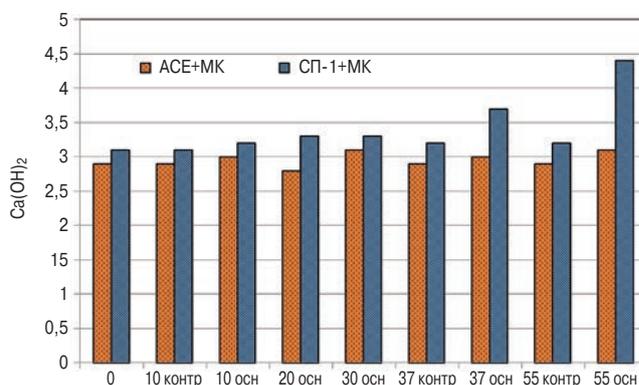


Рис. 7. Влияние циклического замораживания и оттаивания на содержание портландита в цементном камне высокофункционального бетона
 Fig. 7. Effect of cyclic freezing and thawing on portlandite content in cement stone of high-function concrete

ся сравнительно тонкая оболочка насыщенного жидкой фазой слоя бетона, а под ней более сухая часть бетонного образца (рис. 6).

Явление самовысушивания рассматривается у П.-С. Айсина в разделе, посвященном обзору результатов исследований морозостойкости высокофункциональных бетонов с В/Ц не более 0,3 [1]. В этом обзоре приводятся также сведения по испытаниям Т.А. Хаммера и Е.Ж. Селлеволда [21] по низкотемпературной калориметрии высокофункционального бетона, согласно которым его льдистость при -50°C не превышает 10% всей испаряемой влаги. Совокупность всех данных об особенностях структуры цементного камня высокофункциональных бетонов опровергает традиционные представления о механизме разрушения бетона при циклическом замораживании вследствие льдообразования.

Для уточнения структурных особенностей цементного камня высокофункционального бетона было проведено исследование изменения его физико-химических характеристик при циклическом замораживании бетона.

Данные ДТА об изменении содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне исследуемых образцов высокофункционального бетона представлены на рис. 7.

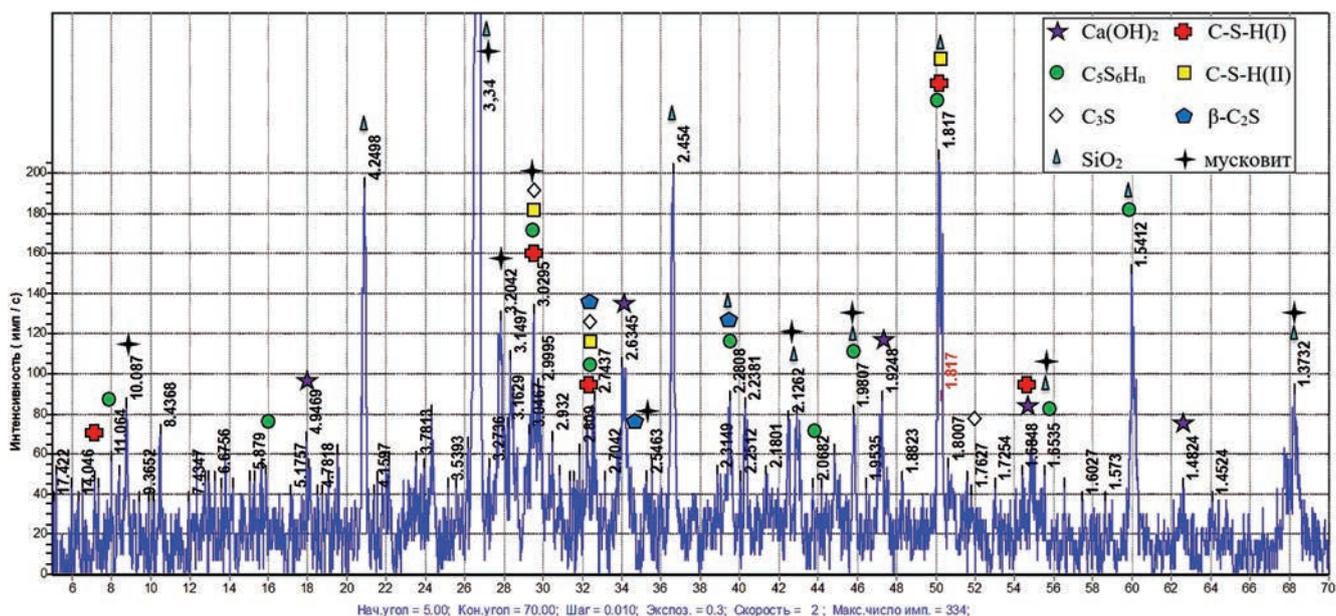


Рис. 8. Рентгенограмма цементного камня бетона, модифицированного ACE+МК, после 55 циклов замораживания
 Fig. 8. Radiograph of concrete cement stone modified with ACE+MK after 55 freezing cycles

Из полученных результатов следует, что количество свободного портландита в цементном камне с добавкой ACE+МК меньше, чем с СП-1+МК, при этом оно изменяется в процессе испытания морозостойкости незначительно, вплоть до 55 циклов. Это свидетельствует о стабильности полученной с ACE+МК микроструктуры гидратных фаз цементного камня.

Содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне с СП-1+МК повышается с увеличением числа циклов замораживания и оттаивания и резко возрастает к 55 циклам, увеличиваясь на ~25%, что говорит о потере стабильности гидросиликатных фаз вследствие перекристаллизации с выделением свободного гидроксида кальция. На поверхности образцов наблюдается пониженная концентрация портландита по сравнению с центральными частями образцов, что позволяет предполагать начало коррозии I вида.

Из РФА цементного камня бетона, модифицированного добавкой ACE+МК, следует, что структура формируется в основном слабозакристаллизованным тоберморитовым гелем ($d/n=11; 5,6; 3,07; 2,97; 2,8; 1,82; 1,67; 1,53 \text{ \AA}$) с соотношением $C/S \leq 1,5$ (рис. 8).

Выводы

1. Высокофункциональные бетоны характеризуются низкими пористостью и водопоглощением из-

за отсутствия макрокапилляров, поэтому при замораживании в них не образуется лед и не увеличивается гидравлическое давление, что делает применение воздухововлекающих добавок необязательным для обеспечения высокой морозостойкости.

2. Для высокофункциональных бетонов не удастся обеспечить марку по морозостойкости выше F_{2400} путем изменения В/Ц, расхода цемента, дозировки пластификаторов и применением воздухововлекающих добавок.

3. Получение высокофункциональных бетонов с маркой по морозостойкости более F_{2500} возможно за счет модификации структуры цементного камня путем применения поликарбоксилатных суперпластификаторов и микрокремнезема, которые обеспечивают получение стабильной низкоосновной гелеобразной структуры.

4. Создание стабильной гелеобразной структуры низкоосновных гидросиликатов кальция цементного камня высокофункционального бетона повышает его прочность, плотность и морозосолеустойкость в условиях минерализованной влаги и низкой отрицательной температуры до -50°C .

5. Стабильность микроструктуры гидратных фаз цементного камня высокофункционального бетона может быть оценена по изменению характера его водопоглощения при испытании морозостойкости по третьему ускоренному методу.

Список литературы / References

1. Aitcin P.-C. High-performance concrete. Quebec: E&FnSpon, 2004. 364 p.
2. Powers T.C. The air requirement of frost-resistant concrete. *Highway Research Board Proceedings*. 1949. No. 29, pp. 184–202.
3. Cordon W.A. Freezing and thawing of concrete. Mechanisms and control. *JACI*. 1966. Vol. 53. No. 5, pp. 613–618.
4. Mac Innis C., Beaudoin G.G. Pore structure and frost durability. *Proceedings. International Symposium Rilem/IUPAC*. Prague. 1973, pp. 3–15.

5. Powers T.C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *Proc. ACI*. 1945. 41, pp. 245–272.
6. Powers T.C., Brownyard T.L. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. *JACI*. 1980. Vol. 77. No. 4, pp. 264–268.
7. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2006. 370 с.
7. Vazhenov Yu.M., Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I. Modifitsirovannye vysokokachestvennyes betony [Modified high quality concrete]. Moscow: ASV. 2006. 370 p.
8. Кузнецова Т.В., Самченко С.В. Микроскопия материалов цементного производства. М.: МИКХиС, 2007. 304 с.
8. Kuznetsova T.V., Samchenko S.V. Mikroskopiya materialov tsementnogo proizvodstva [Microscopy of cement production materials]. Moscow: MIKHiS. 2007. 304 p.
9. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1980. 471 с.
9. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Khimicheskaya tekhnologiya vyazhushchikh veshchestv [Chemical technology of binders]. Moscow: Vysshaya shkola. 1980. 471 p.
10. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1981. 335 с.
10. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savel'ev V.G. Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv [Methods of physico-chemical analysis of binders]. Moscow: Vysshaya shkola, 1981. 335 p.
11. Бугрим С.Ф., Слепокурова Е.И., Мухаметгалеева С.П. К вопросу замерзания воды в капиллярно-пористых телах. *Способы строительства и материалы, применяемые при нефтегазовом строительстве в условиях Севера: Сборник научных трудов*. Москва, 1980. С. 89–96.
11. Bugrim S.F., Slepokurova E.I., Mukhametgaleeva S.P. To the question of freezing water in capillary-porous bodies. *Proceedings: Methods of construction and materials used in oil and gas construction in the North*. Moscow. 1980, pp. 89–96. (In Russian).
12. Shuldyakov K.V., Kirsanova A.A., Kramar L. Ya, Trofimov B. Ya. Hardened cement paste microstructure as the main factor of concrete durability. *IV International Young Researchers Conference «Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects» (YSSIP-2017): MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 143. 02011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814302011>
13. Андреев В.В., Слепокуров Е.И. Исследования фазовых переходов влаги в цементном камне. *Тепловая обработка строительных материалов продуктами сгорания природного газа и их применение: ВНИИСТ*. Москва. 1981. С. 59–69.
13. Andreev V.V., Slepokurov E.I. Studies of the phase transitions of moisture in a cement stone. *Heat treatment of building materials with natural gas combustion products and their application: VNIIST*. Moscow. 1981, pp. 59–69. (In Russian).
14. Fagerlund G. Frost Destruction of concrete – a study of the validity of different mechanisms. *Nordic Concrete Research*. 2018. Iss. 1. Vol. 58, pp. 35–54. <https://doi.org/10.2478/ncr-2018-0003>
15. Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я., Шулдяков К.В. Структурообразование гидратных фаз цементного камня при циклическом замораживании. *Строительство и экология: теория, практика, инновации: Материалы I межд. науч. практ. конф.* Челябинск. 2015. С. 168–175.
15. Trofimov B.Ya., Kramar L.Ya., Shuldyakov K.V. Structural formation of hydrated phases of cement stone during cyclic freezing. *Proceedings of the first international practical conference. Construction and the environment: theory, practice, innovation*. Chelyabinsk. 2015, pp. 168–175. (In Russian).
16. Волжандский А.В. Влияние дисперсности портландцемента и В/Ц на долговечность камня и бетонов // *Бетон и железобетон*. 1990. № 10. С. 16–17.
16. Volzhenskii A.V. The effect of dispersion of Portland cement and W/C on the durability of cement stone and concrete. *Beton i zhelezobeton*. 1990. No. 10, pp. 16–17. (In Russian).
17. Шулдяков К.В., Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я. Морозостойкость дорожного бетона. *Фундаментальные и прикладные науки – основа современной инновационной системы: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Омск. 2015. С. 209–216.
17. Shuldyakov K.V., Trofimov B.Ya., Kramar L.Ya. Frost resistance of road concrete. *Basic and applied science – the basis of the modern innovation system: materials of the international scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists*. Omsk. 2015, pp. 209–216. (In Russian).
18. Ильина Л.В., Хакимуллина С.А., Кадоркин Д.А. Влияние дисперсных минеральных добавок на прочность мелкозернистого бетона // *Фундаментальные исследования*. 2017. №4. С. 34–38.
18. Il'ina L.V., Khakimullina S.A., Kadorkin D.A. The effect of dispersed mineral additives on the strength of fine-grained concrete. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2017. No. 4, pp. 34–38. (In Russian).
19. Баженов Ю.М. Технология бетона. Учебник. М.: АСВ, 2011. 528 с.
19. Vazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Concrete technology]. Moscow: ASV. 2011. 528 p.
20. Zhang Y., Kong X. Correlations of the dispersing capability of NSF and PCE types superplasticizer and their impacts on cement hydration with the adsorption in fresh cement pastes. *Cement and concrete research*. 2015. Vol. 69, pp. 1–9.
21. Hammer T.A. Sellevold E.J. Frost resistance of high-strength concrete. *ACI*. 1990. SP-121. pp. 457–487.

С.В. ФЕДОСОВ¹, д-р техн. наук, академик РААСН (fedosov-academic53@mail.ru);

В.Е. РУМЯНЦЕВА², д-р техн. наук, советник РААСН (varrym@gmail.com),

В.С. КОНОВАЛОВА², канд. техн. наук (kotprotiv@yandex.ru),

А.С. ЕВСЯКОВ², инженер (smart47@rambler.ru),

Н.С. КАСЬЯНЕНКО², канд. техн. наук (kasiyanenko@gmail.com)

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

² Ивановский государственный политехнический университет (153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21)

Моделирование динамики массопереноса в процессах жидкостной коррозии цементных бетонов с учетом явления кольматации

Приведены результаты исследований массообменных процессов, протекающих в пористой структуре цементного бетона при жидкостной коррозии с учетом процесса кольматации. Проведена апробация разработанной математической модели кольматации пор цементных бетонов натурным экспериментом, в результате которого получена информация об элементном составе поверхности образцов после воздействия жидкой среды, позволяющая судить о степени агрессивного воздействия. С помощью сканирующего электронного микроскопа определена глубина проникновения в образец агрессивной среды и установлено изменение концентраций реагирующих ионов по толщине исследуемого образца. По полученным данным произведен расчет значений коэффициентов массопроводности и массоотдачи в исследуемой системе. Рассчитанные характеристики массопереноса свидетельствуют, что вследствие кольматации пор интенсивность массообменных процессов, протекающих в порах образца, уменьшается. При помощи разработанной математической модели кольматации пор цементных бетонов при жидкостной коррозии определены значения скорости кольматации и толщины слоя кольматанта в исследуемом образце. Полученные при обработке экспериментальных данных значения находятся в рассчитанных по математической модели интервалах значений соответствующих величин, изменяющихся по толщине образца по экспоненциальной зависимости. Математическая модель кольматации пор бетона, основанная на уравнениях массопереноса, позволяет оценивать глубину коррозионных повреждений бетонов в средах различной степени агрессивности.

Ключевые слова: массоперенос, коррозия бетона, кольматация, математическое моделирование, показатели массопереноса.

Для цитирования: Федосов С.В., Румянцова В.Е., Коновалова В.С., Евсяков А.С., Касьяненко Н.С. Моделирование динамики массопереноса в процессах жидкостной коррозии цементных бетонов с учетом явления кольматации. // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-27-32>

S.V. FEDOSOV¹, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS (fedosov-academic53@mail.ru);

V.E. RUMYANTSEVA², Doctor of Sciences (Engineering), Adviser of RAACS (varrym@gmail.com),

V.S. KONOVALOVA², Candidate of Sciences (Engineering) (kotprotiv@yandex.ru),

A.S. EVSYAKOV², Engineer (smart47@rambler.ru),

N.S. KASYANENKO², Doctor of Sciences (Engineering) (kasiyanenko@gmail.com)

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

² Ivanovo State Polytechnical University (21, Sheremetevsky Avenue, Ivanovo, 153000, Russian Federation)

Modeling of Mass Transfer Dynamics in the Processes of Liquid Corrosion of Cement Concretes with Due Regard for the Phenomenon of Colmatation

The results of studies of mass transfer processes occurring in the porous structure of cement concrete under liquid corrosion, taking into account the process of colmatation, are presented. The developed mathematical model of pore colmatation of cement concretes was tested by a full-scale experiment, which resulted in obtaining information about the elemental composition of the sample surface after exposure to a liquid medium, which makes it possible to judge the degree of aggressive action. Using a scanning electron microscope, the depth of penetration of the aggressive medium into the sample was determined and the change in the concentration of reacting ions along the thickness of the sample was set. Based on the data obtained, the values of the mass conductivity and mass transfer coefficients in the system under study were calculated. The calculated mass transfer characteristics indicate that due to pore colmatation, the intensity of mass exchange processes occurring in the sample pores decreases. Using the developed mathematical model of pore colmatation of cement concretes under liquid corrosion, the values of the colmatation rate and the thickness of the colmatant layer in the sample under study were determined. The values obtained during the processing of experimental data are found in the intervals of values of the corresponding values calculated using the mathematical model, which vary exponentially in the thickness of the sample. The mathematical model of concrete pore colmatation based on mass transfer equations makes it possible to estimate the depth of concrete corrosion damages in environments of different degrees of aggressiveness.

Keywords: mass transfer, concrete corrosion, colmatation, mathematical modeling, mass transfer indicators.

For citation: Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Konovalova V.S., Evsyakov A.S., Kasyanenko N.S. Modeling of mass transfer dynamics in the processes of liquid corrosion of cement concretes with due regard for the phenomenon of colmatation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 27–32. (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-27-32>

Цементный бетон всегда содержит взаимосвязанные поры разного размера. Поры можно разделить на макропоры, капиллярные и гелевые поры [1]. Размеры гелевых пор варьируются от нескольких долей нм до нескольких нм. Они не влияют на долговечность бетона, поскольку их размеры слишком малы, чтобы обеспечить значительный перенос агрессивных компонентов. Капиллярные поры — это пустоты, не заполненные твердыми продуктами гидратации затвердевшей цементной пасты. Они имеют размеры от 10 до 50 нм, если цементная паста хорошо гидратировалась и была изготовлена с низким водоцементным соотношением, но могут достигать 3–5 мм, если бетон изготовлен с высоким водоцементным соотношением или плохо увлажнен. Большие поры с размерами до нескольких мм появляются в результате захвата воздуха во время перемешивания, который впоследствии не был удален путем уплотнения свежего бетона. Пузырьки воздуха диаметром около 0,05–0,2 мм могут также вводиться в цементную пасту преднамеренно с помощью воздухововлекающих добавок, с тем чтобы обеспечить устойчивость бетона к циклам замораживания-оттаивания [2–4], которые оказывают негативное влияние на механическую прочность бетона, поскольку замерзающая в макропорах вода «проталкивает» незамерзшую воду далее в глубь бетона, увеличивая таким образом внутренние напряжения в микропорах, что приводит к растрескиванию бетона [5].

По мере уменьшения водоцементного отношения или увеличения времени отверждения (и, следовательно, увеличения степени гидратации) снижение пористости происходит в основном за счет уменьшения количества пор больших размеров, которые были заполнены или связаны только гелевыми порами [5].

Объем капиллярных пор (V_{cp}) в цементном бетоне увеличивается с количеством используемой воды и, следовательно, с водоцементным соотношением (В/Ц) и уменьшается со степенью гидратации (h), т. е. долей гидратированного цемента. Объем капиллярных пор (в литрах на 1 кг цемента) можно рассчитать по следующей формуле, предложенной Пауэрсом [6]:

$$V_{cp} = (В/Ц - 0,36h). \quad (1)$$

Таким образом, водоцементное соотношение и степень гидратации остаются основными факторами, которые определяют капиллярную пористость [7].

Уменьшение капиллярной пористости повышает механическую прочность цементного камня и снижает проницаемость гидратированного цемента [8]. Снижение пористости, возникающее как в макропорах, так и в микропорах, играет важную роль в увеличении механической прочности [9].

С другой стороны, влияние пористости на процессы переноса нельзя объяснить просто объемом пор, но необходимо учитывать понятие связности или степень непрерывности пористой системы. При высокой пористости взаимосвязанная капиллярная пористая система простирается от бетонной поверхно-

сти в глубь бетона. Если проницаемость высокая, то процессы переноса, такие как, например, капиллярное всасывание (хлоридсодержащей) воды, могут происходить быстро. С уменьшением пористости капиллярная поровая система теряет свою связность, поэтому процессы переноса контролируются небольшими гелевыми порами. В результате вода и хлориды будут проникать в бетон на небольшую глубину [10]. Это влияние структуры (геометрии) на свойства переноса можно описать с помощью теории перколяции [11]: ниже критической пористости, порога перколяции, капиллярная поровая система не взаимосвязана (присутствуют только конечные кластеры); выше критической пористости капиллярная поровая система непрерывна (бесконечные кластеры). Теория перколяции была использована для разработки численных экспериментов и применена к процессам переноса в цементном камне и растворах [12].

Движение жидкостей и ионов через бетон может происходить согласно четырем основным механизмам: капиллярное всасывание за счет капиллярного действия внутри капилляров цементного камня; проницаемость за счет градиентов давления; диффузия за счет градиентов концентрации и миграция за счет градиентов электрического потенциала [1, 13, 14]. Кинетика переноса зависит от механизма, от свойств бетона, например его пористости и наличия трещин, от связывания гидратированным цементом переносимых веществ, а также от условий окружающей среды на поверхности бетона (микроклимата) и их изменений во времени.

В капиллярных порах вода сначала адсорбируется на их поверхности, а затем по мере увеличения относительной влажности конденсируется и заполняет поры, начиная с самых маленьких и перемещаясь до более крупных пор [15].

Наличие водонаполненных пор, связанных между собой, оказывает заметное влияние на кинетику процессов переноса. Оно препятствует тем процессам, которые легко протекают в газовой фазе, таким как диффузия кислорода и углекислого газа. С другой стороны, оно облегчает процессы, которые происходят в водном растворе, такие как диффузия хлорид-ионов или ионов вообще.

Проникновение агрессивных веществ в бетон часто происходит за счет диффузии, т. е. под влиянием градиента концентрации. O_2 , CO_2 , Cl^- или SO_4^{2-} перемещаются через поры с поверхности, где они присутствуют в более высоких концентрациях, во внутренние зоны, где их концентрация ниже. Газы диффундируют гораздо быстрее через открытые поры, чем через водонасыщенные (диффузия газов в воде на 4–5 порядков медленнее, чем на воздухе). С другой стороны, хлорид и сульфат-ионы диффундируют только при растворении в поровой воде; диффузия более эффективна при насыщении, чем в частично насыщенных порах [16, 17].

В условиях стационарного (однаправленного и постоянного) массопереноса первый закон Фика



Рис. 1. Ячейка для исследования проницаемости мембран
Fig. 1. Installation for the study of membrane permeability

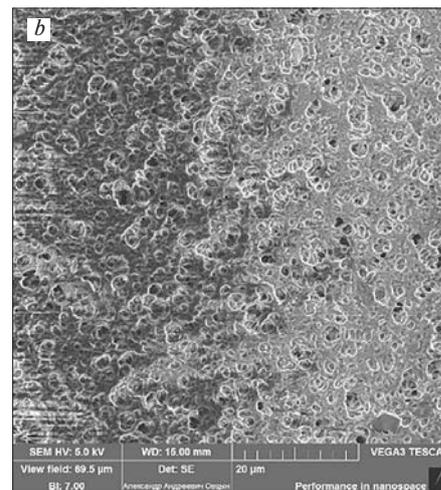
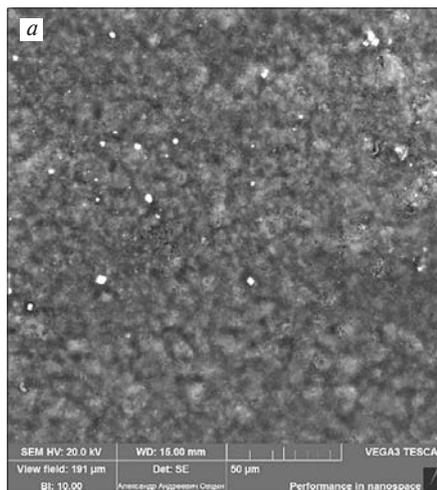


Рис. 2. Поверхность мембран после проведения испытания на проницаемость: *a* – 1-й слой; *b* – 2-й слой
Fig. 2. Membrane surface after permeation test: *a* – the first layer; *b* – the second layer

описывает явление диффузии в капиллярно-пористых телах [18]:

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (2)$$

где F – плотность потока (кг/(м²·с)); C – концентрация диффузионных частиц на расстоянии x от поверхности; D – коэффициент диффузии переносимого компонента в твердом теле (м²/с), который зависит от диффузионных частиц, характеристик бетона и условий окружающей среды. Этот коэффициент может меняться в зависимости от положения и времени, последующих изменений в структуре пор (т. е. из-за гидратации цемента) или внешней влажности (соответственно степени насыщения пор), или температуры.

Поскольку диффузия редко достигает стационарных условий в бетонных конструкциях, поток зависит от времени τ и регулируется вторым законом Фика [18]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Вещества, которые диффундируют в бетон, могут в определенной степени связываться с компонентами цементной матрицы, например хлориды связываются с алюминатными фазами или адсорбируются на стенках пор и капилляров; диоксид углерода реагирует с щелочными компонентами, в частности с Ca(OH)₂ [19]. Постепенное потребление этих соединений изменяет условия диффузии, которые уже не могут быть просто описаны вторым законом Фика, но требуют корректировки.

Для проникновения хлоридов часто учитывается общая концентрация диффузионных веществ, а влияние химических реакций в бетоне не учитывается. Фактически связывающая способность цементного камня зависит от различных параметров, таких как локальная концентрация данного вещества и температура. Она также будет зависеть от химического состава бетона и, следовательно, от его изменений (например, связывающая способность хлоридов

значительно снижается в газобетоне) [20]. Было показано [21, 22], что даже при наличии связывания хлориды переходят в бетон так, как если бы скорость их проникновения определялась диффузией.

Ранее был проведен обзор существующих подходов к изучению процесса кольтатации пор и капилляров цементных бетонов [23] и представлена разработанная математическая модель кольтатации пор бетона при жидкостной коррозии второго вида [24], получены зависимости скорости кольтатации и толщины кольтатанта от массообменного критерия Фурье и порозности слоя осадка.

Для изучения массообменных процессов, протекающих в пористой структуре цементного бетона при жидкостной коррозии, с учетом процесса кольтатации был изготовлен образец толщиной 3 мм и диаметром 2,5 см, состоящий из 30 слоев фторопластовых мембран со средним диаметром пор 0,8 мкм. Мембраны предварительно были выдержаны в растворе Ca(OH)₂ с концентрацией 1,3 г/л в течение 7 сут. Образец был помещен в ячейку для исследования проницаемости мембран, схематичное изображение которой представлено на рис. 1. Сверху над образцом находился столб 2%-го раствора MgCl₂ с давлением

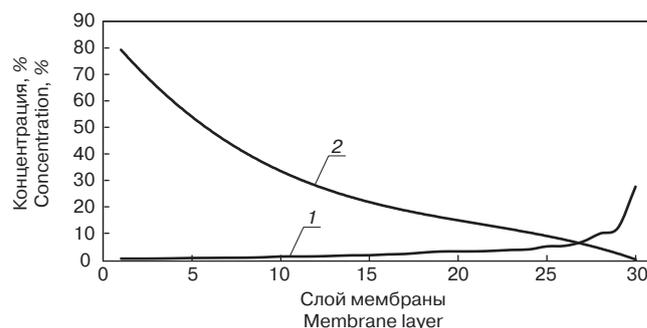


Рис. 3. Изменение концентрации реагирующих ионов по толщине образца: 1 – C(Ca), %; 2 – C(Cl), %
Fig. 3. The change in the concentration of reacting ions over the thickness of the sample: 1 – C(Ca), %; 2 – C(Cl), %

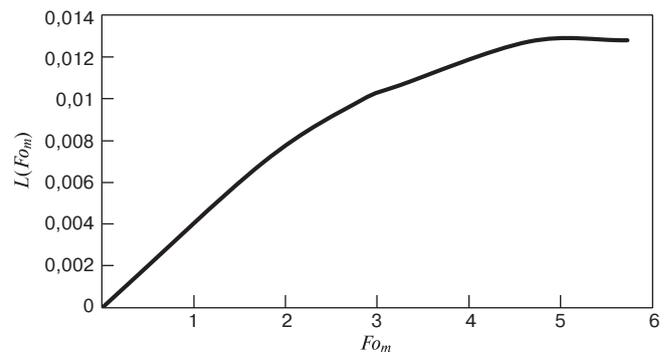
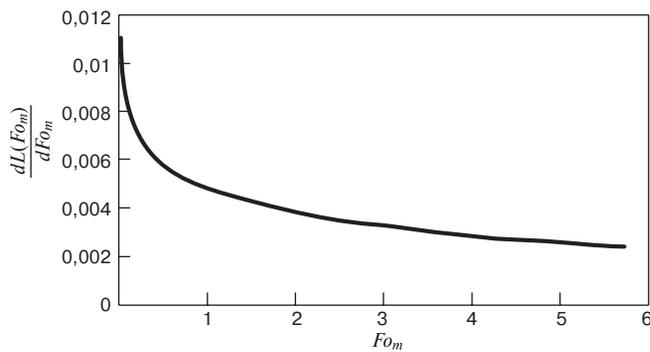


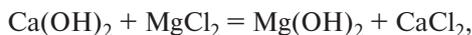
Рис. 4. Изменение скорости кольматации $\frac{dL(Fo_m)}{dFo_m}$ (a) и толщины слоя кольматанта $L(Fo_m)$ (b)

Fig. 4. Change in the rate of colmatization $\frac{dL(Fo_m)}{dFo_m}$ (a) and the thickness of the layer of colmatant $L(Fo_m)$ (b)

0,6 МПа. Образец выдерживался в ячейке в течение года, после чего мембраны были высушены.

Исследование поверхности мембран проводилось при помощи сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 SBH с приставкой для элементного анализа и распылительной установкой для нанесения углеродного покрытия.

На рис. 2, а видно, что на верхнем слое в порах мембраны осадился продукт реакции:



но уже на втором слое (рис. 2, b) следов кольматанта в порах мембраны не обнаружено. На остальных слоях в порах кольматанта также нет.

Определение элементного состава поверхности каждой мембраны показало, что по толщине слоев концентрация хлорид-ионов уменьшается, а концентрация катионов кальция, наоборот, увеличивается (рис. 3).

На поверхности первого слоя концентрация катионов кальция минимальна (0,44%), поскольку весь кальций, находящийся в порах мембраны, прореагировал с хлорид-ионами из раствора MgCl_2 . Минимальное содержание катионов кальция сохраняется до пятого слоя мембран, затем она постепенно повышается, поскольку вследствие кольматации пор продуктами коррозии проникновение хлорид-ионов по толщине образца замедляется. На поверхности по-

следнего тридцатого слоя образца концентрация катионов кальция составила 27,59%, а концентрация хлорид ионов – 1,06%.

По полученным данным произведен расчет значений коэффициентов массопроводности и массоотдачи в исследуемой системе: $k=9,7 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$; $\beta=6,47 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$. При пересчете на систему цементный бетон – 2%-й MgCl_2 получены значения $k=7,38 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$; $\beta=6,47 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$.

При помощи разработанной математической модели кольматации пор цементных бетонов при жидкостной коррозии [24] определены значения скорости кольматации $\frac{dL(Fo_m)}{dFo_m}$ и толщины слоя кольматанта $L(Fo_m)$ в исследуемом образце. Полученные при обработке экспериментальных данных значения находятся в рассчитанных по математической модели интервалах значений соответствующих величин [24], изменяющихся по толщине образца по экспоненциальной зависимости (рис. 4).

Имея представление о кинетике массообменных процессов и механизме естественной кольматации при жидкостной коррозии цементных бетонов, можно не только прогнозировать долговечность бетонов, но и управлять процессами коррозионной деструкции, влияя на скорость коррозии посредством искусственной кольматации пор и капилляров бетона.

Список литературы

1. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. 298 с.
2. Розенталь Н.К., Усачев И.Н., Чехний Г.В. Долговечный железобетон для арктических районов России // Региональная энергетика и энергосбережение. 2017. № 2. С. 58–60.
3. Girskas G., Nagrockienė D., Skripkiūnas G. Frost resistance of hardened cement paste modified with synthetic zeolite // Engineering Structures and Technologies. 2013. Vol. 5. No. 1, pp. 30–36. DOI: <https://doi.org/10.3846/2029882X.2013.777119>
4. Zauskas L., Skripkiūnas G., Girskas G. Influence of aggregate granulometry on air content in concrete mixture and freezing-thawing resistance of concrete //

References

1. Lykov A.V. Yavleniya perenosa v kapillyarno-poristyh telah [Transfer phenomena in capillary-porous bodies]. Moscow: State publishing house of technical and theoretical literature. 1954. 298 p.
2. Rosental N.K., Usachev I.N., Chehniy G.V. Durable reinforced concrete for the Arctic regions of Russia. Regional'naja jenergetika i jenergoberezhenie. 2017. No. 2, pp. 58–60. (In Russian).
3. Girskas G., Nagrockienė D., Skripkiūnas G. Frost resistance of hardened cement paste modified with synthetic zeolite. Engineering Structures and Technologies. 2013. Vol. 5. No. 1, pp. 30–36. DOI: <https://doi.org/10.3846/2029882X.2013.777119>
4. Zauskas L., Skripkiūnas G., Girskas G. Influence of aggregate granulometry on air content in concrete

- Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172, pp. 1278–1285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.153>
5. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Redaelli E., Polder R.B. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair. Viernheim: John Wiley & Sons. 2013. 434 p.
 6. Powers T.C. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste // *Journal of American Ceramic Society*. 1958. Vol. 41. No. 1, pp. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1958.tb13494.x>
 7. Phung Q.T., Maes N., Jacques D., De Schutter G., Ye G. Effects of W/P ratio and limestone filler on permeability of cement pastes // *International RILEM Conference Materials, Systems and Structures in Civil Engineering 2016*. At Lyngby, Denmark, pp. 141–151. DOI: 10.13140/RG.2.2.14118.93766
 8. Федюк Р.С. Проектирование цементных композитов повышенной непроницаемости // *Вестник МГСУ*. 2016. № 5. С. 72–81.
 9. Антонян А.А. Водонепроницаемость бетона с суперпластификаторами // *Технологии бетонов*. 2017. № 3–4 (128–129). С. 36–39.
 10. Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Ким Л.В. Дegradaция железобетонных конструкций морских сооружений от совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72>
 11. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. London: Taylor&Francis. 1992. 192 p.
 12. Лотов В.А. Периодичность процессов гидратации и твердения цемента // *Строительные материалы*. 2018. № 7. С. 55–59. DOI: 10.31659/0585-430X2018-761-7-55-59
 13. Гусев Б.В., Файвусович А.С. Математическая теория процессов коррозии бетона // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 7. С. 58–63.
 14. Shi C.J., Deng D.H., Xie Y.J. Pore structure and chloride ion transport mechanisms in concrete // *Key Engineering Materials*. 2006. Vol. 302–303, pp. 528–535. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.528>
 15. Yu Z., Ni C., Mingliang T., Shen X. Relationship between water permeability and pore structure of Portland cement paste blended with fly ash // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 175, pp. 458–466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.147>
 16. Каюмов Р.А., Кашафдинова А.Ф. Методика описания процесса деградации бетонных конструкций под влиянием солевой коррозии // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 2 (44). С. 288–295.
 17. Осипов С.Н., Захаренко А.В., Чик В.М. Некоторые стохастические особенности карбонизации бетона и железобетона // *Наука и техника*. 2019. Т. 18. № 2. С. 127–136.
 18. Marcus P. Corrosion mechanisms in theory and practice: Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2011. 941 p.
 19. Любомирский Н.В., Федоркин С.И., Рыжиков А.Н. Моделирование процессов принудительного карбонатного твердения известкового камня mixture and freezing-thawing resistance of concrete. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172, pp. 1278–1285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.153>
 5. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Redaelli E., Polder R.B. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair. Viernheim: John Wiley & Sons. 2013. 434 p.
 6. Powers T.C. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste. *Journal of American Ceramic Society*. 1958. Vol. 41. No. 1, pp. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1958.tb13494.x>
 7. Phung Q.T., Maes N., Jacques D., De Schutter G., Ye G. Effects of W/P ratio and limestone filler on permeability of cement pastes. *International RILEM Conference Materials, Systems and Structures in Civil Engineering 2016*. At Lyngby, Denmark, pp. 141–151. DOI: 10.13140/RG.2.2.14118.93766
 8. Fedyuk R.S. Design of cement composites with increased impermeability. *Vestnik MGSU*. 2016. No. 5, pp. 72–81. (In Russian).
 9. Antonyan A.A. Resistance of concrete with superplasticizers. *Tekhnologii betonov*. 2017. No. 3–4 (128–129), pp. 36–39. (In Russian).
 10. Shalyi E.E., Leonovich S.N., Kim L.V. Degradation of reinforced concrete structures of marine works from the combined impact of carbonation and chloride aggression. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 67–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72>
 11. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. London: Taylor&Francis. 1992. 192 p.
 12. Lotov V.A. Periodicity of processes of cement hydration and hardening. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 7, pp. 55–59. DOI: 10.31659/0585-430X2018-761-7-55-59 (In Russian).
 13. Gusev B.V., Fayvusovich A.S. Mathematical theory of processes of concrete corrosion. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2019. No. 7, pp. 58–63. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.07.58-63>
 14. Shi C.J., Deng D.H., Xie Y.J. Pore structure and chloride ion transport mechanisms in concrete. *Key Engineering Materials*. 2006. Vol. 302–303, pp. 528–535. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.528>
 15. Yu Z., Ni C., Mingliang T., Shen X. Relationship between water permeability and pore structure of Portland cement paste blended with fly ash. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 175, pp. 458–466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.147>
 16. Kayumov R.A., Kashafdinova A.F. Method of describing the degradation process of concrete constructions under the influence of salt corrosion. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2018. No. 2 (44), pp. 288–295. (In Russian).
 17. Osipov S.N., Zakharenko A.V., Chik V.M. Some stochastic specific features of concrete and reinforced concrete carbonization. *Nauka i tekhnika*. 2019. Vol. 18. No. 2, pp. 127–136. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-127-136>
 18. Marcus P. Corrosion mechanisms in theory and practice: Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2011. 941 p.
 19. Lubomirskiy N.V., Fedorkin S.I., Ryzhakov A.N. The modeling of half-dry pressure lime stone forced car-

- полусухого прессования. Ч. 1. Математическая модель // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии.* 2017. № 2. С. 14–25.
20. Chalabi H., Bezzar A.-I., Abdelhafid K. Chloride transport in partially saturated cementitious material: Influence of hydric state and binding chloride // *Magazine of Concrete Research.* 2017. Vol. 69. Iss. 21, pp. 1103–1114. DOI: <https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00342>
21. Claisse P. *Transport Properties of Concrete: Measurements and Applications.* Cambridge: Woodhead Publishing. 2014. 312 p.
22. Šomodíková M., Strauss A., Zambon I., Teplý B. Quantification of parameters for modeling of chloride ion ingress into concrete. *Structural Concrete.* 2018. Vol. 20. Iss. 1, pp. 519–536. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201800049>
23. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Евсяков А.С. Кольматация: явление, теория, перспективы применения для управления процессами коррозии бетонов // *Строительные материалы.* 2017. № 10. С. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-753-10-10-17>
24. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Коновалова В.С., Евсяков А.С. Математическое моделирование кольматации пор бетона при коррозии // *Инженерно-строительный журнал.* 2018. № 7 (83). С. 198–207.
- bonation processes. Part 1. The mathematical model. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Materialy. Konstrukcii. Tehnologii.* 2017. No. 2, pp. 14–25. (In Russian).
20. Chalabi H., Bezzar A.-I., Abdelhafid K. Chloride transport in partially saturated cementitious material: Influence of hydric state and binding chloride. *Magazine of Concrete Research.* 2017. Vol. 69. Iss. 21, pp. 1103–1114. DOI: <https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00342>
21. Claisse P. *Transport Properties of Concrete: Measurements and Applications.* Cambridge: Woodhead Publishing. 2014. 312 p.
22. Šomodíková M., Strauss A., Zambon I., Teplý B. Quantification of parameters for modeling of chloride ion ingress into concrete. *Structural Concrete.* 2018. Vol. 20. Iss. 1, pp. 519–536. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201800049>
23. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Colmatation: phenomenon, theory, prospects of using for control over concrete corrosion processes. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials].* 2017. No. 10, pp. 10–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-753-10-10-17>. (In Russian).
24. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal.* 2018. No. 7 (83), pp. 198–207. DOI: 10.18720/MCE.83.18.

23-25 сентября

📍 ВДНХЭКСПО Уфа 2020

БВК
БАШКИРСКАЯ
ВЫСТАВОЧНАЯ
КОМПАНИЯ

ФОРУМ УРАЛСТРОЙИНДУСТРИЯ



Специализированные выставки

Строительство
Ярмарка недвижимости

Свяжитесь
с нами

www.stroybvk.ru
stroy@bvkexpo.ru

+7 (347) 246-41-80

+7 (347) 241-74-19

📷 stroybvk

f stroyexpo.ufa

#бвк

#стройбвк



К 70-летию Владимира Геннадьевича ГАГАРИНА

17 мая 2010 г. исполнилось 70 лет Владимиру Геннадьевичу Гагарину, доктору технических наук, профессору, члену-корреспонденту РААСН, заведующему лабораторией строительной теплофизики НИИСФ РААСН. Практически вся трудовая жизнь В.Г. Гагарина связана с Научно-исследовательским институтом строительной физики, где с 1975 г. он прошел путь от старшего техника до заведующего лабораторией строительной теплофизики.

В.Г. Гагарин в 1978 г. окончил Ленинградский институт водного транспорта, где получил специальность инженера-электромеханика, а в 1994 г. — Экономическую академию при Министерстве экономики РФ по специальности макроэкономическое планирование и регулирование. В 2000 г. Владимир Геннадьевич защитил докторскую диссертацию по двум специальностям на тему «Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий».

В.Г. Гагарин продолжил работы своих учителей: В.А. Могутова, В.Н. Богословского, Ф. Ушкова, В.Р. Хлевчука, и в настоящее время является одним из лидеров научной школы по строительной теплофизике. В сфере его научных интересов комплексные исследования теплофизических свойств ограждающих конструкций, в том числе теплозащиты, влажностного режима, аэродинамики в воздушных прослойках. Он занимается также теплофизическими свойствами строительных материалов, экономическими вопросами теплозащиты и энергосбережения, историей строительной физики и др.

Владимиром Геннадьевичем были разработаны методы расчета нестационарного влажностного режима ограждающих конструкций и определены расчетные характеристики материалов для этих расчетов; предложен элементный подход для расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, на основе которого разработаны методики, включенные в четыре СП; разработаны методы экономической оценки и сравнения повышения теплозащиты ограждающих конструкций зданий. Существенный вклад им сделан в исследование эксплуатационных теплофизических показателей строительных материалов и в развитие соответствующих теоретических положений, создана теория расчета удельной поверхности и гистерезиса сорбционного увлажнения строительных материалов, разработана теория нестационарной теплопроводности в материалах и др. Он участвовал в разработке и внедрении конструкций стеновых панелей с повышенными теплозащитными свойствами на ДСК в Петрозаводске, Норильске, Сургуте и др. Принимал участие в научном сопровождении проектирования и строительства ряда уникальных объектов, например, Храма Христа Спасителя. Занимается разработкой методов расчета при проектировании ограждающих конструкций с повышенными теплозащитными свойствами.

В.Г. Гагарин является автором ряда нормативных документов, в том числе СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий». Им опубликовано более 200 научных работ и изобретений, в том числе монографии. Под его руководством защищено 11 кандидатских диссертаций.

Научную деятельность Владимир Геннадьевич успешно совмещает с преподавательской. Он является профессором кафедры ТГВ в Московском государственном строительном университете, по совместительству работает в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. В.Г. Гагарин является председателем диссертационного совета НИИСФ РААСН и членом диссертационных советов МГСУ и КГАСУ. Деятельность в качестве руководителя подкомитетов ТК465 по ограждающим конструкциям и по энергосбережению и члена ИСО позволяет ему стратегически правильно расставлять приоритеты в развитии нормотворчества тепловой защиты зданий.

В.Г. Гагарин — Почетный строитель России, лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, имеет ряд отраслевых профессиональных наград.

В.Г. Гагарин является членом редакционных советов ряда научных журналов, в том числе журнала «Жилищное строительство». С журналом «Строительные материалы»[®] Владимира Геннадьевича Гагарина связывают многие годы плодотворного сотрудничества: он постоянный автор, строгий, но доброжелательный рецензент, научный консультант.

Редакция, редакционный совет, коллеги поздравляют Владимира Геннадьевича Гагарина с 70-летием и желают ему крепкого здоровья, новых научных достижений, успехов во всех начинаниях и неиссякаемой энергии.

УДК 666.198

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-33-38>

В.Г. ГАГАРИН^{1, 2, 3}, д-р техн. наук, член-кorr. РААСН (gagarinv@yandex.ru);

П.П. ПАСТУШКОВ^{1, 2}, канд. техн. наук (pavel-one@mail.ru)

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

² Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Мичуринский пр., 1)

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Сорбция водяного пара материалами минераловатных изделий современного производства. Часть II

Представлено исследование взаимосвязи сорбционной влажности с пористой структурой на примере теплоизоляционных изделий из минеральной (стеклянной) ваты производства ООО «УРСА Евразия». Проведены экспериментальные исследования сорбции водяного пара на материалах изделий URSA шести марок из стеклянного волокна современного производства. Полученные изотермы сорбции всех исследованных марок оказались близки между собой, существенно различалась в зависимости от марки только максимальная сорбционная влажность. Зависимости между сорбцией водяного пара и плотностью изделия не установлено. Выдвинута гипотеза о том, что сорбция водяного пара существенно зависит от содержания всех органических веществ (не только связующего) в минеральной вате. Построена осредненная изотерма сорбции минераловатных изделий URSA, которая может быть использована при расчетах влажностного режима ограждающих конструкций зданий. По экспериментально полученным

изотермам сорбции определена площадь удельной поверхности исследованных материалов, сделаны выводы о преобладающей роли мезопористости изделий из стеклянного волокна в процессе сорбции водяного пара. Результаты исследования структурных характеристик могут быть использованы при дальнейшем изучении их влияния на эксплуатационные характеристики минераловатных изделий. Эти аспекты будут отражены в следующих частях работы.

Ключевые слова: сорбция водяного пара, изотерма сорбции, минераловатные изделия, связующее, волокно, площадь удельной поверхности, мезопористость.

Для цитирования: Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Сорбция водяного пара материалами минераловатных изделий современного производства. Часть II // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-33-38>

V.G. GAGARIN^{1, 2, 3}, Doctor of Sciences, (Engineering), Corresponding Member RAACS (gagarinvg@yandex.ru);

P.P. PASTUSHKOV^{1, 2}, Candidate of Sciences (Engineering) (pavel-one@mail.ru)

¹ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivniy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

² Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University (1, Michurinsky Avenue, Moscow, 119192, Russian Federation)

³ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Sorption of Water Vapor Materials of Mineral Wool Products of Modern Manufacture. Part II

The article is devoted to studies of the relationship of sorption humidity with a porous structure on the example of thermal insulation products made of mineral (glass) wool produced by "URSA Eurasia". Experimental studies of water vapour sorption on the materials of URSA 6 brands of glass wool products of modern production were carried out. The obtained sorption isotherms of all the studied brands were close to each other, and only the maximum sorption humidity significantly differed depending on the brand. The relationship between the sorption of water vapour and density of the product is not installed. It is hypothesized that the sorption of water vapour significantly depends on the content of all organic substances (not only the binder) in the mineral wool. An averaged isotherm of sorption of mineral wool products URSA was constructed, which can be used for calculating the humidity regime of building envelope structures. Based on experimentally obtained sorption isotherms, the specific surface area of the studied materials was determined, and conclusions were made about the predominant role of mesoporosity of glass fiber products in the process of water vapour sorption. The results of the study of structural characteristics can be used in the further study of their impact on the performance of mineral wool products. These aspects will be reflected in the following parts of the work.

Keywords: water vapor sorption, sorption isotherm, mineral wool products, binder, fiber, specific surface area, mesoporosity.

For citation: Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Sorption of water vapor materials of mineral wool products of modern manufacture. Part II. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 33–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-33-38>

Сорбцией называется процесс поглощения водяного пара материалом из окружающей среды, который приводит к равновесному влажностному состоянию материала с окружающей средой. Основной характеристикой этого равновесного влажностного состояния является изотерма сорбции водяного пара материалом, которая представляет собой зависимость равновесной влажности материалов от относительного давления водяного пара (относительной влажности воздуха) [1]. Современная теория сорбционного увлажнения строительных материалов представлена в [2].

Как отмечено в первой части статьи [3] в строительной теплофизике изотермы сорбции используются при рассмотрении вопросов, связанных с влажностным состоянием материалов в конструкциях. Во многих случаях сорбция водяного пара из окружающего воздуха является основным механизмом увлажнения материала в ограждающей конструкции. Поэтому эта характеристика так важна для теплоизоляционных материалов — от нее в том числе зависит теплопроводность при эксплуатационных условиях [4–6]. Наряду со строительной теплофизикой изотермы сорбции также успешно используются при исследовании характеристик пористой структуры материалов [7, 8]. В свою очередь, характеристики пористой структуры могут быть использованы для прогнозирования эксплуатационных свойств материалов [9–11].

В настоящей статье рассматривается связь сорбционной влажности с пористой структурой на примере теплоизоляционных изделий из минеральной (стеклянной) ваты производства ООО «УРСА Евразия», а также проведено сравнение с получен-

ными ранее результатами исследований [7] сорбции водяного пара материалами того же производителя.

Результаты определения сорбции водяного пара материалами URSA

В работе 2007 г. [7] были исследованы материалы плит URSA из стеклянной ваты марок П-15, П-30, П-45 с соответствующими плотностями. Вместе с ними в [7] по методике ГОСТ 24816 «Материалы строительные. Метод определения равновесной сорбционной влажности» были проведены исследования компонентов, из которых состоят эти изделия, — стекловолокна и связующего.

При подготовке второй части статьи в лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН были проведены исследования на материалах изделий из стеклянного волокна современного производства шести марок: URSA 36 PN (плотностью 15 кг/м³); URSA 37 PN (аналог марки П-15 плотностью 16 кг/м³); URSA 35 QN (плотностью 20 кг/м³); URSA 34 PN (плотностью 21 кг/м³); URSA 32 PN (аналог марки П-30 плотностью 26 кг/м³) и URSA 30 PN (плотностью 75 кг/м³). Методика испытаний описана в первой части статьи [3].

Полученные изотермы сорбции всех исследованных марок, так же как и при ранее проведенных испытаниях [7], оказались близки между собой, существенно различалась только максимальная сорбционная влажность (при относительной влажности воздуха 97%): от 1,69% для марки URSA 32 PN до 2,1% для марки URSA 35 QN. Зависимости между сорбционной влажностью и плотностью изделий

Таблица 1
Table 1Результаты определения сорбции водяного пара материалов URSA
Results of determination of water vapour sorption URSA materials

Материал	Сорбционная влажность, мас. %, при температуре (20±2)°С и относительной влажности воздуха, %				
	40	60	80	90	97
Фенолформальдегидное связующее	4,01	7,81	19,2	34,7	46,2
Стекловолоконная вата (без связующего)	0,08	0,12	0,29	0,78	1,02
Плиты марки URSA П-15	0,31	0,44	0,87	2,28	3,78
Плиты марки URSA 37 PN	0,03	0,21	0,57	1,2	1,8

установлено не было, при этом для марок с заявленным одинаковым содержанием связующего и близкими плотностями – 36 PN – 37 PN и 34 PN – 35 QN были получены практически одинаковые изотермы сорбции, что говорит о влиянии этой характеристики на сорбционную влажность.

В табл. 1 представлены полученные ранее в [7] результаты для марки П-15, отдельно для стекловолоконного волокна и для фенолформальдегидного связующего, а также результаты, полученные для современного аналога этой марки – URSA 37 PN.

Как видно из данных табл. 1, при современных исследованиях для аналогичной марки получены значения сорбционной влажности примерно в два раза ниже значений при испытаниях 2007 г., за исключением значения сорбционной влажности при 40% относительной влажности воздуха, которое отличается на порядок от ранее зафиксированных значений.

Если массовая доля связующего в материале составляет p , кг/кг, то формулу для расчета сорбционной влажности изделия по известным сорбционным влажностям его компонентов – связующего и волокна – можно записать в виде:

$$w_{\text{св}} = w_{\text{в}} \cdot (1-p) + w_{\text{с}} \cdot p, \quad (1)$$

где $w_{\text{в}}$ – сорбционная влажность волокна, %; $w_{\text{с}}$ – сорбционная влажность связующего, %; $w_{\text{св}}$ – сорбционная влажность изделия, кг/кг.

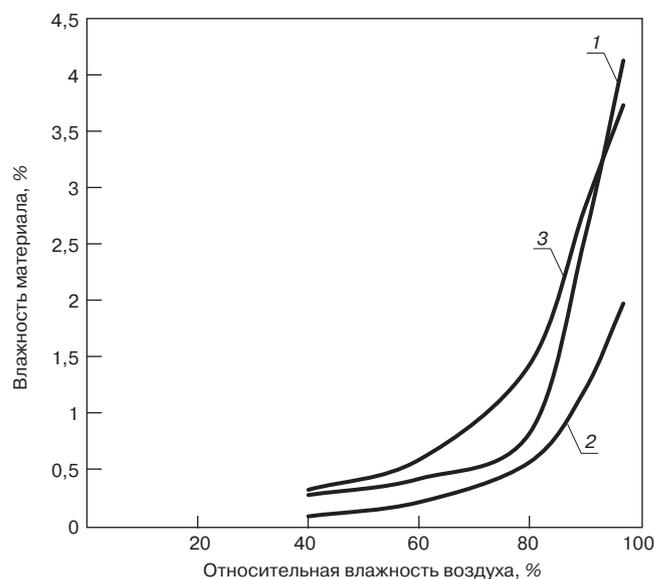
С помощью расчета по формуле (1) возможно получать изотерму сорбции минеральной ваты, если известны изотермы сорбции волокна и связующего, а также массовая доля связующего в материале. Для исследованных марок изделий содержание синтетического связующего варьировалась от 5 до 8% по массе, а в среднем составляла 6%, т. е. $p=0,06$.

В работе [7] была введена осредненная изотерма сорбции для исследованных марок. С целью сравнения полученных результатов на современных марках на рисунке представлена построенная подобным образом осредненная изотерма, а также изотерма, полученная расчетом по формуле (1) при $p=0,06$.

Так же как и на примере отдельной марки, средняя сорбционная влажность для исследованных современных марок изделий получилась примерно в два раза ниже, чем при исследованиях 2007 г. Такой результат на практике может потенциально говорить

о понижении эксплуатационной влажности для современных изделий, так как сорбция водяного пара является одним из основных механизмов увлажнения теплоизоляционных материалов в составе ограждающих конструкций зданий.

Найденная осредненная изотерма сорбции качественно согласуется с расчетной изотермой. В современных изделиях из стекловолоконного волокна правильно разделять компоненты не на волокно и синтетическое связующее, а на волокно (неорганического происхождения) и органические вещества: связующее, гидрофобизаторы, обеспыливатели, красители и др. При продолжении работы необходимо заново провести испытания на стекловолокне (сорбция может отличаться из-за изменения средней толщины волокон), экспериментально установить содержание органических веществ, а затем из формулы (1) вычислить сорбционную влажность органических составляющих. Также представляет практический интерес проведение подобных исследований для каменной ваты современного производства и сравнение результатов со стекловолоконной ватой.



Изотермы сорбции, осредненные по результатам исследований в разные годы: 1 – осредненная изотерма для марок из работы [7]; 2 – осредненная изотерма для современных марок; 3 – расчетная изотерма по формуле (1) при $p=0,06$

Sorption isotherms averaged by research results in different years: 1 – averaged isotherm for grades from [7]; 2 – averaged isotherm for modern brands; 3 – calculated isotherm according to the formula (1) at $p=0.06$

Таблица 2
Table 2

Оценка мезо- и микропористости материалов URSA
Assessment of meso- and microporosity of URSA materials

Марка изделия	Плотность, кг/м ³	Максимальная сорбционная влажность, мас. % (при относительной влажности воздуха 97%)	Объем мезо- и микропор $V \times 10^{-5}$, м ³ /кг	Средний радиус мезо- и микропор $r \times 10^{-10}$, м (r , Å)
URSA 36 P	15	1,82	1,8	430
URSA 37 P	16	1,8	1,8	425
URSA 35 Q	20	2,1	2,1	495
URSA 34 P	21	2,06	2,1	485
URSA 32 P	26	1,69	1,7	400
URSA 30 P	75	1,91	1,9	450

Исследование характеристик пористой структуры

К характеристикам пористой структуры минераловатных изделий, которые можно определить по изотерме сорбции водяного пара, относятся площадь удельной поверхности и мезопористость (иногда и микропористость) материала. Согласно классификации, принятой в теории сорбции, к мезопорам относятся поры радиусом от 16 до примерно 1000 Å (1 Ангстрем= 10^{-10} м), поры меньшего радиуса называются микропорами, поры большего радиуса – макропорами. Удельной поверхностью называют поверхность пор единицы массы материала (данная характеристика отличается от одноименной, определяемой методом продуваемости воздухом).

Определение этих характеристик основано на применении теории адсорбции и теории капиллярной конденсации. Явление адсорбции состоит в том, что молекулы воды «прилипают» к поверхности пор за счет сил взаимодействия с поверхностью твердого тела. Явление капиллярной конденсации заключается в понижении давления насыщенного водяного пара над вогнутой поверхностью капиллярных менисков, которые образуются при заполнении капилляров водой. В результате происходит конденсация водяного пара на поверхности менисков при относительной влажности воздуха, меньшей 100%. Капиллярная конденсация происходит в мезопорах, поэтому эти поры и выделены в отдельную группу. Микропоры заполняются посредством других механизмов сорбции при малых значениях относительной влажности воздуха. При сорбции водяного пара реальными строительными материалами являются и адсорбция, и капиллярная конденсация.

Согласно теории полимолекулярной адсорбции, предложенной в 1938 г. С. Брунауэром, П. Эмметом и Э. Теллером, изотерма адсорбции описывается уравнением (уравнением БЭТ):

$$\frac{\varphi}{w(1-\varphi)} = \frac{1}{w_m c} + \frac{c-1}{w_m c} \varphi, \quad (2)$$

где φ – относительная влажность воздуха, доли ед.; w – сорбционная влажность материала, кг/кг; w_m – сорбционная влажность материала, соответствующая заполнению первого адсорбированного молекулярного слоя (емкость монослоя), кг/кг; c – константа, называемая константой уравнения БЭТ.

Уравнение БЭТ позволяет определить емкость монослоя и константу БЭТ по известным экспериментальным точкам изотермы сорбции. По известной емкости монослоя можно вычислить площадь удельной поверхности адсорбента (материала). Метод с использованием уравнения БЭТ был принят в качестве эталонного для определения удельной поверхности адсорбентов [12]. Однако уравнение БЭТ описывает только начальный участок изотермы сорбции (при значениях φ не более 0,35), который определяют вакуумным методом. Метод, позволяющий расширить диапазон до значений $\varphi=0,45-0,5$, был разработан в [13] и успешно применялся для изотерм сорбции, определенных динамическим методом [2, 14].

Недостатком эксикаторного метода, который положен в основу ГОСТ 24816–2014, является большая сложность при определении начального участка изотермы сорбции, вследствие чего этот участок практически никогда не определяется. Это, в свою очередь, не позволяет непосредственно по экспериментально полученной изотерме сорбции определять методом БЭТ емкость монослоя. При экспериментальном определении сорбционной влажности материалов по методике ГОСТ 24816 в области, соответствующей адсорбционному увлажнению (не осложненному капиллярной конденсацией), определяется только одна точка при $\varphi=0,4$.

В работе [2] был разработан приближенный метод расчета емкости монослоя по одной экспериментальной точке изотермы сорбции. Погрешность такого расчета по сравнению с эталонным методом БЭТ зависит от материала и значения φ , которому соответствует взятое для расчета значение сорбционной влажности. Так, если для расчета взято значение сорбционной влажности при $\varphi=0,4$, то для большинства строительных материалов (кроме пенопластов) эта погрешность не превышает 11% относительно метода БЭТ. В рассматриваемом случае сорбции водяного пара минераловатными изделиями при $\varphi=0,4$ емкость монослоя w_m , кг/кг, согласно этому методу вычисляется по формуле:

$$w_m = \frac{w_{40}}{1,27}, \quad (3)$$

где w_{40} – сорбционная влажность материала, кг/кг, при относительной влажности воздуха 40%, т. е. при $\varphi=0,4$.

По известному значению емкости монослоя w_m , кг/кг, вычисляется площадь удельной поверхности материала A , м²/кг, по формуле:

$$A = \frac{w_m}{M_a} N_A A_m, \quad (4)$$

где M_a – молекулярная масса воды, равная 18 кг/кмоль; N_A – число Авогадро, равное $6,02 \times 10^{26}$ молекул/кмоль; A_m – посадочная площадь одной молекулы воды, принимают равной $10,6 \times 10^{-20}$ м² исходя из наиболее плотной упаковки адсорбированных молекул воды [12].

Полученные значения сорбционной влажности исследованных марок минераловатных изделий URSA при 40% относительной влажности воздуха ($\varphi=0,4$) близки между собой и примерно равны: $w_{40}=0,03\%$ (0,0003 кг/кг), поэтому емкость монослоя по формуле (3) для современных марок URSA примерно равна: $w_m=2,4 \times 10^{-4}$ кг/кг, следовательно, площадь удельной поверхности по формуле (4) составляет: $A=850$ м²/кг=0,85 м²/г.

Объем мезо- и микропор V , м³/кг, можно оценить по величине максимальной сорбционной влажности w_{97} , кг/кг, по формуле:

$$V = \frac{w_{97}}{1000}. \quad (5)$$

Средний радиус мезо- и микропор материалов (в предположении, что форма пор цилиндрическая) r , м, можно оценить по формуле:

$$r = \frac{2V}{A}. \quad (6)$$

Установленная максимальная сорбционная влажность и оценка по формулам (5) и (6) объема и среднего радиуса мезо- и микропор материалов для исследованных марок изделий URSA представлены в табл. 2.

Средние значения радиусов пор для всех исследованных марок составляют от 400 до 500 Å. Это показывает, что основной объем, занимаемый молекулами воды при сорбции водяного пара, приходится на мезопоры. Качественно это подтверждает результат, полученный в [7].

Список литературы

1. Гагарин В.Г. Сорбция и десорбция водяного пара материалами ограждающей конструкции: В кн: Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Т. 2. М.: Минстрой РФ. 1995. С. 425–427.
2. Гагарин В.Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий. Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 396 с.
3. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Сорбция водяного пара материалами минераловатных изделий современного производства // *Строительные материалы*. 2019. № 6. С. 40–43. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-40-43>
4. Пастушков П.П. О проблемах определения теплопроводности строительных материалов // *Стро-*

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования на материалах изделий URSA из минерального (стеклянного) волокна современного производства подтвердили снижение сорбционной влажности по сравнению с результатами исследований материалов этого же производителя, проведенными более десяти лет назад, как на полностью аналогичных марках, так и по средним значениям. Полученные изотермы сорбции всех исследованных марок оказались близки между собой, существенно различалась в зависимости от марки только максимальная сорбционная влажность. Зависимости между сорбционной влажностью и плотностью изделия не установлено. При этом выдвинута гипотеза о том, что сорбция водяного пара существенно зависит от содержания всех органических веществ (не только связующего) в минеральной вате: для ее подтверждения необходимо провести дополнительные исследования. Построенная осредненная изотерма сорбции минераловатных изделий URSA может использоваться, например, при расчетах нестационарного влажностного режима ограждающих конструкций зданий по методике ГОСТ 32494–2013 «Здания и сооружения. Метод математического моделирования температурно-влажностного режима ограждающих конструкций (Переводное издание)» [15].

По экспериментально полученным изотермам сорбции определена площадь удельной поверхности исследованных материалов, сделаны выводы о преобладающей роли мезопористости изделий из стеклянного волокна в процессе сорбции водяного пара. Результаты исследования структурных характеристик могут быть использованы при дальнейшем изучении их влияния на эксплуатационные характеристики минераловатных изделий. Они также представляют интерес при исследованиях долговечности, поскольку образование льда в порах материала существенно определяется его структурой. Эти аспекты будут подробно отражены в следующих частях работы.

References

1. Gagarin V.G. Sorbtsiya i desorbtsiya vodyanogo para materialami ograzhdayushchei konstruktssii / V kn. Rossiiskaya arkhitekturno-stroitel'naya entsiklopediya» [Sorptions and desorption of water vapor of the building envelope materials. In the book. «Russian Architectural and Construction Encyclopedia»]. Vol. 2. Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation. 1995, pp. 425–427.
2. Gagarin V.G. Theory of state and moisture transfer in building materials and heat-shielding properties of enclosing structures of buildings. Doctor diss. (Engineering). Moscow. 2000. 396 p. (In Russian).
3. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Sorption of water vapor materials of mineral wool products of modern manufacture. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 6, pp. 40–43. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-40-43>

- тельные материалы. 2019. № 4. С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63>
5. Куприянов В.Н., Юзмухаметов А.М., Сафин И.Ш. Влияние влаги на теплопроводность стеновых материалов. Состояние вопроса // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 1 (39). С. 102–110.
 6. Киселев И.Я. Влияние равновесной сорбционной влажности строительных материалов на сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций зданий // *Жилищное строительство*. 2013. № 6. С. 39–40.
 7. Гагарин В.Г., Мехнецов И.А., Ивакина Ю.Ю. Сорбция водяного пара материалами теплоизоляционных плит производства ООО «УРСА ЕВРАЗИЯ» // *Строительные материалы*. 2007. № 10. С. 41–50.
 8. De Burgh J.M., Foster S.J., Valipour H.R. Prediction of water vapour sorption isotherms and microstructure of hardened Portland cement pastes // *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 81, pp. 134–150. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.009>
 9. De Burgh J.M., Foster S.J. Influence of temperature on water vapour sorption isotherms and kinetics of hardened cement paste and concrete // *Cement and Concrete Research*. 2017. Vol. 92, pp. 37–55. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.11.006>
 10. Киселев И.Я. Повышение точности определения теплофизических свойств теплоизоляционных строительных материалов с учетом их структуры и особенностей эксплуатационных воздействий. Дис... д-р техн. наук. Москва. 2006. 366 с.
 11. Kymäläinen M., Ben Mlouka S., Belt T., Merk V., Liljeström V., Hänninen T., Rautkari L. Chemical, water vapour sorption and ultrastructural analysis of Scots pine wood thermally modified in high-pressure reactor under saturated steam // *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53 (4), pp. 3027–3037. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1714-1>
 12. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. Пер. с англ., 2-е изд. М.: Мир, 1984. 306 с.
 13. Гагарин В.Г. О модификации *t*-метода для определения удельной поверхности макро- и мезопористых адсорбентов // *Журнал физической химии*. 1985. Т. 59. № 5. С. 1838–1839.
 14. Hosseinpourpia R., Adamopoulos S., Holstein N., Mai C. Dynamic vapour sorption and water-related properties of thermally modified Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood pre-treated with proton acid // *Polymer Degradation and Stability*. 2017. Vol. 138, pp. 161–168. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.009
 15. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Определение расчетной влажности строительных материалов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 8. С. 28–3.
 4. Pastushkov P.P. On the problems of determining the thermal conductivity of building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 4, pp. 57–63. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63>
 5. Kupriyanov V.N., Yuzmuhametov A.M., Safin I.Sh. The effect of moisture on the thermal conductivity of wall materials. State of the matter. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2017. No. 1 (39), pp. 102–110. (In Russian).
 6. Kiselyov I.Ya. Influence of equilibrium sorption humidity of building materials on resistance to heat transfer of external enveloping structures of buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing construction]. 2013. No. 6, pp. 40. (In Russian).
 7. Gagarin V.G., Mekhnetsov I.A., Ivakina Yu.Yu. Water vapor sorption by materials of heat-insulating plates manufactured by URSA EURASIA. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 10, pp. 41–50. (In Russian).
 8. De Burgh J.M., Foster S.J., Valipour H.R. Prediction of water vapour sorption isotherms and microstructure of hardened Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 81, pp. 134–150. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.009>
 9. De Burgh J.M., Foster S.J. Influence of temperature on water vapour sorption isotherms and kinetics of hardened cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*. 2017. Vol. 92, pp. 37–55. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.11.006>
 10. Kiselev I.Ya. Improving the accuracy of determining the thermophysical properties of insulating building materials with regard to their structure and characteristics of operational impacts. Doctor diss. (Engineering). Moscow. 2006. 366 p. (In Russian).
 11. Kymäläinen M., Ben Mlouka S., Belt T., Merk V., Liljeström V., Hänninen T., Rautkari L. Chemical, water vapour sorption and ultrastructural analysis of Scots pine wood thermally modified in high-pressure reactor under saturated steam. *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53 (4), pp. 3027–3037. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1714-1>
 12. Greg S., Sing K. Adsorbtsiya, udel'naya poverkhnost', poristost' [Adsorption, specific surface area, porosity]. Moscow: Mir. 1984. 306 p.
 13. Gagarin V.G. On the modification of the *t*-method for determining the specific surface of macro- and mesoporous adsorbents. *Zhurnal fizicheskoy khimii*. 1985. Vol. 59. No. 5, pp.1838-1839. (In Russian).
 14. Hosseinpourpia R., Adamopoulos S., Holstein N., Mai C. Dynamic vapour sorption and water-related properties of thermally modified Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood pre-treated with proton acid. *Polymer Degradation and Stability*. 2017. Vol. 138, pp. 161–168. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.009
 15. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Determination of the calculated moisture content of building materials. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015. No. 8, pp. 28–33. (In Russian).

УДК 544.774.2

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-39-43>

П.П. ПАСТУШКОВ^{1, 2}, канд. техн. наук (pavel-one@mail.ru);
 С.И. ГУТНИКОВ^{2, 3}, канд. хим. наук (gutnikov@gmail.com);
 Н.В. ПАВЛЕНКО^{1, 2}, канд. техн. наук (9103638838@mail.ru);
 М.Д. СТОЛЯРОВ¹, инженер (m_100lyarov@mail.ru)

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1)

³ СИЦ «Теплоизоляция» (119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1, стр. 77)

Исследования теплопроводности рулонных материалов на основе аэрогеля

Приведены общие понятия об аэрогелях, описаны сферы применения материалов на их основе. Дан обзор научно-технической литературы на тему исследований теплопроводности теплоизоляционных материалов с использованием аэрогеля: установлено, что в отечественной литературе результатов таких исследований при высокой температуре не описано. Проведен комплекс исследований теплофизических характеристик рулонного теплоизоляционного материала на основе аэрогеля диоксида кремния серии DRT06-Z производства Alison Aerogel, в том числе испытания теплопроводности в диапазоне температуры от 10 до 650°C (максимальной температуры применения). Установлена математическая зависимость теплопроводности данного материала от температуры в исследованном диапазоне. По полученным результатам проведены расчеты толщины изоляции из испытанного рулонного материала на основе аэрогеля в соответствии с методиками СП 61.13330.2010, которые можно применять при проектировании тепловой изоляции оборудования и трубопроводов от высокотемпературных воздействий.

Ключевые слова: аэрогель, теплопроводность, тепловая изоляция, трубопроводы, высокотемпературные воздействия.

Для цитирования: Пастушков П.П., Гутников С.И., Павленко Н.В., Столяров М.Д. Исследования теплопроводности рулонных материалов на основе аэрогеля // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 39–43.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-39-43>

P.P. PASTUSHKOV^{1, 2}, Candidate of Sciences (Engineering) (pavel-one@mail.ru); S.I. GUTNIKOV^{2, 3} Candidate of Sciences (Chemistry) (gutnikov@gmail.com); N.V. PAVLENKO^{1, 2}, Candidate of Sciences (Engineering) (9103638838@mail.ru); M.D. STOLYAROV¹, engineer (m_100lyarov@mail.ru)

¹ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

² Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie gori, Moscow, 119234, Russian Federation)

³ Certification research center «Thermal insulation» (1/77, Leninskie gori, Moscow, 119234, Russian Federation)

Investigation of Thermal Conductivity of Rolled Materials Based on Aerogel

In this article, the general information about aerogels as well as application areas of materials based on them are presented. Scientific and technical review on heat conductivity of aerogel-based thermal insulation materials was made. It was determined, that among the Russian studies the results of behaviour of these materials under high temperatures are not presented. Comprehensive studies of thermal characteristics, including heat conductivity values in temperature range of 10–650°C (where 650°C is the maximal operating temperature) for the thermal insulation rolled materials based on SiO₂-aerogel DRT06-Z (Alison Aerogel) were carried out. The mathematical relationship between heat conductivity and operating temperature in range of 10–650°C was determined. Using the obtained results, the calculation of thickness of insulation for the studied aerogel-based rolled materials was realized according to the construction rules SP 61.13330.2010, that can be applied for design of high-heat insulation for equipment and pipelines.

Keywords: aerogel, heat conductivity, thermal insulation, pipelines, high-temperature effect.

For citation: Pastushkov P.P., Gutnikov S.I., Pavlenko N.V., Stolyarov M.D. Investigation of thermal conductivity of rolled materials based on aerogel. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 39–43. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-39-43>

В настоящее время на рынке теплоизоляционных материалов все чаще встречаются изделия из композиционных материалов с применением аэрогелей различного состава в качестве высокопористых компонентов. Аэрогелями называют класс материалов, представляющих собой гель, в котором жидкая фаза полностью замещена газообразной. Аэрогели имеют структуру с открытой пористостью более 90% микро- и нанодиапазона и большую площадь удельной поверхности. Аэрогель образован жестко связанными частицами органического или неорганического вещества, образующими высокопористый каркас, заполненный воздухом или газом. Благодаря такой

структуре материал имеет низкие теплопроводность, коэффициент преломления света, диэлектрическую проницаемость и скорость распространения звука [1].

Первые упоминания об аэрогеле в научно-технической литературе появились в 30-х гг. XX в., однако из-за отсутствия промышленной технологии производства он не имел практического применения. Лишь в конце XX в. методы получения различных видов аэрогелей были усовершенствованы, что открыло возможность внедрения материалов на их основе в различных отраслях. В настоящее время аэрогели находят все более широкое применение в космических исследованиях, химии, энергетике,



Рис. 1. Примеры использования рулонных материалов на основе аэрогеля для тепловой изоляции оборудования и трубопроводов
Fig. 1. Application of aerogel-based rolled materials for heat insulation of equipment and pipelines

медицине, охране окружающей среды и др. [2–7]. При этом благодаря уникальным теплофизическим свойствам аэрогелей одной из основных сфер практического применения материалов с их использованием стала тепловая защита от воздействия как высокой, так и низкой температуры.

Аэрогели наряду с вакуумными изоляционными панелями являются одними из самых эффективных (теплопроводность ниже $0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ при комнатной температуре) теплоизоляционных материалов на сегодняшний день. В отличие от вакуумных панелей аэрогели имеют перспективу для использования при высокой температуре.

В настоящее время разработано большое количество композиционных материалов, содержащих аэрогели в сочетании с другими компонентами, придающими требуемые свойства [8, 9]. Для теплоизоляционных и теплозащитных материалов это, как правило, неорганические тугоплавкие компоненты из числа уже используемых в качестве теплоизоляции, а именно керамические, стеклянные, минеральные волокна. В качестве аэрогелевого компонента используют как органические, так и неорганические материалы, однако если необходима высокотемпературная теплозащита, то применяются неорганические аэрогели. Из неорганических аэрогелей промышленно производятся только аэрогели диоксида кремния [10–13].

Достаточно высокая стоимость материалов на основе аэрогелей по сравнению с традиционными теплоизоляционными материалами усложняет их широкое применение в качестве общестроительной тепловой изоляции. При этом совокупность улучшенных теплотехнических и физико-механических свойств современных рулонных материалов на основе аэрогеля дает ряд значительных преимуществ при теплоизоляции труб, емкостей, оборудования, резервуаров, поэтому такие материалы все чаще встречаются на промышленных объектах (рис. 1), несмотря на их стоимость. Настоящая статья посвящена описанию проведенных авторами исследований теплопроводности

рулонного материала серии DRT06-Z производства Alison Aerogel, состоящего из стекловолокна и аэрогеля диоксида кремния, а также расчетов с использованием полученных результатов необходимой толщины для изоляции оборудования и трубопроводов от высокотемпературных воздействий.

Описание исследований

Проведенный обзор современной научно-технической литературы на тему теплопроводности материалов на основе аэрогеля показал фактическое отсутствие отечественных исследований на эту тему. Все статьи сводятся либо к обзору зарубежных исследований [1, 14], либо же к описанию испытаний теплопроводности при средней температуре 25°C [15, 16], что может представлять интерес только для общестроительной изоляции, но практически неприменимо для технической изоляции. Поэтому в секторе испытаний теплофизических характеристик строительных материалов лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН совместно с СИЦ «Теплоизоляция»



Рис. 2. Испытание теплопроводности на приборе GHP 456 Titan
Fig. 2. Heat conductivity test applying machine GHP 456 Titan

Таблица 1
Table 1

Результаты определения теплопроводности материала серии DRT06-Z
Heat conductivity of aerogel DRT06-Z at different temperature

Средняя температура в образце t_{cp} , °C	Теплопроводность в сухом состоянии λ_0 , Вт/(м·°C)
10	0,019
25	0,02
125	0,025
300	0,039
400	0,056
500	0,072
650	0,112

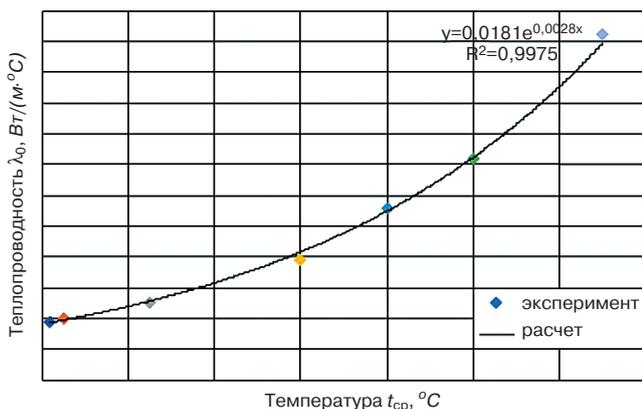


Рис. 3. Зависимость теплопроводности от температуры материала серии DRT06-Z

Fig. 3. Effect of temperature on heat conductivity of aerogel DRT06-Z

был проведен комплекс исследований рулонного материала серии DRT06-Z, включающий определение следующих эксплуатационных характеристик: паропроницаемость, сорбционная влажность, водопоглощение при кратковременном и длительном погружении, прочность при сжатии и при 10% деформации, прочность при растяжении параллельно лицевым поверхностям, гибкость на брусе, а также испытания теплопроводности в диапазоне температуры от 10 до 650°C (максимальной температуры применения для данного материала).

Для испытаний теплопроводности при высокой температуре в образце использовался уникальный для РФ прибор GHP 456 Titan (рис. 2). Испытания при средней температуре от 100 до 650°C проводились на трех образцах материала серии DRT06-Z, подготовленных в виде пластин размерами 0,3×0,3 м в соответствии с методикой ГОСТ 7076–99 в защитной среде азота. Для испытаний при температуре от 10 до 45°C использовался измеритель теплопроводности

ИТП-МГ4 «250» с образцами размером 0,25×0,25 м. За результат испытания при каждой температуре принималось среднеарифметическое значение теплопроводности всех испытанных образцов [17].

В табл. 1 представлены полученные экспериментальные данные по теплопроводности рулонного материала на основе аэрогеля серии DRT06-Z.

На рис. 3 представлен график с нанесенными значениями теплопроводности исследованного материала при разной температуре из табл. 1, а также кривая, аппроксимирующая эти данные.

Исследования аэрогелей показывают, что при высокой температуре (выше 600°C) начинается спекание наночастиц оксида кремния, что способствует изменению структуры аэрогелей [18–20]. Изменение пористости и увеличение радиационной составляющей теплопроводности при высокой температуре приводит к нелинейному росту теплопроводности аэрогелей, что согласуется с полученными экспериментальными данными (рис. 3).

Таблица 2
Table 2

Толщина слоя рулонной теплоизоляции серии DRT06-Z по заданной температуре ее наружной поверхности
Required thickness of rolled material DRT06-Z vs. temperature of its external surface

Диаметр трубопровода, мм	Температура носителя, °C											
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
	Температура на поверхности тепловой изоляции, °C											
	40			45						55		
Толщина теплоизоляции, мм												
50	3	6	6	10	16	20	23	30	36	26	36	43
80	3	6	10	13	16	20	26	33	43	30	40	50
100	3	6	10	13	20	23	30	40	46	36	43	53
150	3	6	10	16	20	26	33	40	46	36	43	53
200	3	6	10	16	23	30	36	46	53	40	50	60
250	3	6	10	16	23	30	36	46	56	46	56	66
300	3	6	10	16	23	30	40	46	56	46	56	70
500	3	10	13	20	26	33	43	53	66	56	66	80
1000	3	10	13	20	30	36	46	56	70	60	70	83

Использование полученных результатов

Найденная зависимость теплопроводности в сухом состоянии λ_0 , Вт/(м·°C), рулонного материала на основе аэрогеля серии DRT06-Z от средней температуры t_{cp} , °C, описывается математической формулой:

$$\lambda = 0,0181 \cdot e^{0,0028 \cdot t_{cp}}$$

и позволяет находить теплопроводность во всем диапазоне температуры применения исследованного материала.

Благодаря этому результату были произведены расчеты толщин тепловой изоляции из рулонного материала на основе аэрогеля серии DRT06-Z в соответствии с методиками СП 61.13330.2010, СНиП 41-03-2003 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов», в том числе были определены толщины теплоизоляционного слоя по нормированной плотности теплового потока для трубопроводов с положительной температурой, расположенных на открытом воздухе и в помещении, а также были определены толщины теплоизоляционного слоя по заданной температуре на поверхности изоляции.

В табл. 2 приведен фрагмент расчета толщины изоляции по заданной температуре ее наружной поверхности, проведенного по методике приложения В.2.3 СП 61.13330.2010 с учетом номенклатуры толщин изделий из рулонного материала серии DRT06-Z: 3; 6; 10 мм. Температура на поверхности тепловой изоляции принималась для изолируемых поверхностей, расположенных в рабочей или обслуживаемой зонах помещений, согласно п. 6.7 СП 61.13330.2010.

Заключение

В результате проведенного комплекса исследований рулонного материала серии DRT06-Z производства Alison Aerogel получен ряд эксплуатационных теплофизических характеристик, при этом некоторые характеристики исследованы впервые для теплоизоляционных материалов на основе аэрогеля. Полученные результаты теплопроводности при температуре эксплуатации от 10 до 650°С значительно ниже значений теплопроводности у традиционных теплоизоляционных материалов, используемых для технической изоляции от высокотемпературных воздействий. Такое сравнение является темой для отдельного исследования. Установленная математическая зависимость теплопроводности от температуры позволила провести расчеты толщин тепловой изоляции из рулонного материала на основе аэрогеля серии DRT06-Z в соответствии с методиками СП 61.13330.2010, что в свою очередь дает возможность применять полученные результаты при проектировании тепловой изоляции оборудования и трубопроводов от высокотемпературных воздействий.

Список литературы / References

1. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Карасева Т.А. Применение аэрогелей для создания теплоизоляционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 6 (78). С. 32–42.
1. Babashov V.G., Varrick N.M., Karaseva T.A. Using of aerogels for production of heat insulative materials (the review). *Trudy VIAM*. 2019. No. 6 (78), pp. 32–42. (In Russian).
2. Ding B., Si Y., Ge J., Tang X., Huang M., Zhu J., & Jianyong Yu. Three-dimensional fiber-based airtel tissue engineering scaffold and production method thereof. *Faming Zhuanli Shenqing*. Donghua University, Peop. Rep. China. 2013.
3. Tikhomirov B.A. Sorption of atmospheric gases (N₂, O₂, Ar, CO₂, and H₂O) by silica aerogel. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2018. Vol. 31. No. 3, pp. 232–237.
4. Baskakov S.A., Manzhos R.A., Lobach A.S., Baskakova Y.V., Kulikov A.V., Martynenko V.M., Kabachkov E.N., Krivenko A.G., Shulga Y.M., Milovich F.O., Kumar Y., Michtchenko A. Properties of a granulated nitrogen-doped graphene oxide aerogel. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. Vol. 498, pp. 236–243. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2018.06.035
5. Singh P., Tan C.M. Time evolution of packaged LED lamp degradation in outdoor applications. *Optical Materials*. 2018. Vol. 86, pp. 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.10.009>
6. Kudryavtsev P.G., Figovsky O.L. Nanocomposite organomineral hybrid materials. Part III. *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал* [Nanotechnologii v stroitel'stve: online scientific journal]. 2016. Vol. 8. No. 3, pp. 16–49.
7. Issa A.A., Luyt A.S. Kinetics of alkoxy silanes and organoalkoxy silanes polymerization: a review. *Polymers*. 2019. Vol. 11. No. 3. 537. <https://doi.org/10.3390/polym11030537>
8. Воронова М.И., Сузов О.В., Рублева Н.В., Кочкина Н.Е., Захаров А.Г. Диспергирование нанокристаллической целлюлозы в органических растворителях // *Химия растительного сырья*. 2019. № 1. С. 39–50. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019014240>
8. Voronova M.I., Surov O.V., Rubleva N.V., Kochkina N.E., Zakharov A.G. Dispersibility of nanocrystalline cellulose in organic solvents. *Khimiya Rastitel'noyo Syr'ya*, 2019. No. 1, pp. 39–50. (In Russian). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019014240>
9. Khusain B.K., Shlygina I.A., Brodsky A.R., Zhurinov M.Z. Quantum chemical modeling of reagents and products in the process of siloxane airtel formation. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016. Vol. 7. No. 5, pp. 3073–3082.
10. Луговской А.А., Осипов К.Ю., Тихомиров Б.А. Сорбция молекул воды нанопорами кремниевого (SiO₂) аэрогеля // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. № 2. С. 124–127.
10. Lugovskoy A.A., Osipov K.Yu., Tikhomirov B.A. Sorption of water molecules by silicon (SiO₂) airtel

- nanopores. *Optika Atmosfery i Okeana*. 2017. Vol. 30. No. 02, pp. 124–127 (In Russian).
11. Lugovskoi A., Duchko A. The D₂O absorption spectra in SiO₂ airtel pores: technical features of treatment. *Proc. SPIE 9680, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 968004. 19 November 2015. <https://doi.org/10.1117/12.2205341>
 12. Sinitza L., Lugovskoi A. The D₂O absorption spectra in the treatment surfaces SiO₂ airtel. *Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 92920N. 25 November 2014. <https://doi.org/10.1117/12.2074812>.
 13. Duchko A., Dudaryenok A., Lugovskoi A., Serdyukov V., Tikhomirov B. The D₂O absorption spectra in SiO₂ airtel pores: technical features of treatment. 2016. *Conference: XXII International Symposium Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics*. Tomsk, Russia. Vol. 10035. DOI: 10.1117/12.2249250.
 14. Пустовгар А.П., Веденин А.Д. Теплоизоляционные наноконкомпозиты на основе аэрогеля кремнезема // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2013. № 1. С. 252–254.
 14. Pustovgar A.P., Vedenin A.D. Heat insulative nanocomposites on the base of SiO₂-aerogel. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya*. 2013. No. 1, pp. 252–254. (In Russian).
 15. Baikov I.R., Smorodova O.V., Trofimov A.Y., & Kuznetcova E.V. Experimental study of heat-insulating aerogel-based nanomaterials // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал* [Nanotekhnologii v Stroitel'stve: online scientific journal]. 2019. Vol. 11. No. 4, pp. 462–477. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-4-462-477
 16. Шиндряев А.В., Кожевников Ю.Ю., Лебедев А.Е., Меньшутина Н.В. Исследование процесса получения теплоизоляционных материалов на основе аэрогелей // *Успехи в химии и химической технологии*. 2017. Т. 31. № 6 (187). С. 130–132.
 16. Shindryaev A.V., Kozhevnikov Yu.Yu., Lebedev A.E., Menshutina N.V. Study of the process of production of thermal insulation aerogels-based materials. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2017. Vol. 31. No. 6 (187), pp. 130–132. (In Russian).
 17. Пастушков П.П. О проблемах определения теплопроводности строительных материалов // *Строительные материалы*. 2019. № 4. С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63>
 17. Pastushkov P.P. On the problems of determining the thermal conductivity of building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 4, pp. 57–63. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63>
 18. Huang D., Guo C., Zhang M., Shi L. Characteristics of nanoporous silica aerogel under high temperature from 950°C to 1200°C. *Materials & Design*. Vol. 129, pp. 82–90. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.05.024
 19. Lyu S., Yang X., Shi D. Effect of high temperature on compression property and deformation recovery of ceramic fiber reinforced silica aerogel composites. *Science China Technological Sciences*. 2017. Vol. 60, pp. 1681–1691.
 20. Nasibullin R.T., Ponomarev Y.N., Cherepanov V.N. Interaction potential of H₂O molecules and water layer adsorbed on surface of aerogel nanopores. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2018. 1083304. DOI: 10.1117/12.2503791



При поддержке Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь, Союза строителей, ГП «Институт жилища НИПТИС им. Атаева С.С.», ГП «Институт НИИСМ», РУП «Институт БелНИИС» проектное предприятие «ТНКА-Архитек»

XI Международная научно-практическая конференция

ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

6–8 октября 2020 г.

г. Минск и г. Береза (Беларусь)

Тематика конференции

- ◆ особенности технического перевооружения и модернизации производственных линий
- ◆ использование инновационных технических и организационных решений, информационных технологий в области управления процессами производства
- ◆ оптимизация производств, совершенствование эксплуатационных свойств материала с применением химических добавок и микрофибр, исследования в области объемного армирования
- ◆ обеспечение высокого качества и оптимальных параметров изделий в процессе производства, транспортировки, применения и эксплуатации строительных объектов
- ◆ расширение номенклатуры изделий для полносборного строительства
- ◆ особенности и практика применения конструкционно-теплоизоляционных изделий из ячеистого бетона сниженной плотности с позиции долговечности конструкций
- ◆ опыт проектирования и возведения энергоэффективных жилых домов с комплексным применением ячеистого бетона
- ◆ изучение использования ячеистого бетона в нетрадиционных сферах
- ◆ тенденции и перспективы развития отрасли ячеистого бетона автоклавного твердения, анализ рынков соседних стран, сертификация соответствия продукции по европейским стандартам

Формат конференции предусматривает пленарное заседание, работу по секциям и посещение производства ячеистого бетона и вибропрессованных плит, укомплектованного линиями полного цикла Masa-Henke, в ОАО «Березовский КСИ».

Срок подачи докладов, статей и рекламных модулей в сборник материалов конференции – 1 сентября 2020 г. Заполненную заявку отправлять в оргкомитет до 25 сентября 2020 г. по электронной почте info@architect.by Более подробная информация размещена на сайте организаторов www.architect.by
 Техническое консультирование – «MASA GmbH» (Германия). Информационные партнеры: журнал «Строительные материалы» (Москва, Россия), «Строительные материалы» (Киев, Украина), журнал «Архитектура и строительство» (Минск, Беларусь), строительный портал «ЛайтБетон» (Россия), Национальная ассоциация производителей автоклавного газобетона, Всеукраинская ассоциация производителей автоклавного газобетона

Н.П. УМНЯКОВА, д-р техн. наук (n.umniakova@mail.ru)

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

Метод оценки термического сопротивления вспененного полиэтилена с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги

Для обеспечения энергосбережения в зданиях целесообразно использовать эффективные теплоизоляционные материалы, в частности, имеющие малый коэффициент излучения. К ним можно отнести многослойные материалы из вспененного полиэтилена с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги, расположенной между слоями пенополиэтилена. В настоящее время оценка теплоизоляционных характеристик таких материалов – термического сопротивления и теплопроводности проводится только экспериментальным путем. В статье представлен разработанный расчетный метод определения термического сопротивления многослойного пенополиэтилена с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги между слоями, учитывающий передачу теплоты в материале как за счет процесса теплопроводности, так и за счет излучения. Приведены исследования образцов многослойного материала различной толщины экспериментальными и расчетными методами. Сопоставления значений термического сопротивления, полученных различными методами, показали хорошую сходимость, что позволяет использовать разработанный расчетный метод для вычисления термического сопротивления образцов из вспененного полиэтилена малой плотности с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги. Также проведенные исследования подтвердили, что вспененный полиэтилен с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги между слоями пенополиэтилена является эффективным теплоизоляционным материалом.

Ключевые слова: пенополиэтилен, отражательная теплоизоляция, термическое сопротивление, метод расчета.

Для цитирования: Умнякова Н.П. Метод оценки термического сопротивления вспененного полиэтилена с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 44–49.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-44-49>

N.P. UMNYAKOVA, Doctor of Sciences (Engineering) (n.umniakova@mail.ru)

Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

Method for evaluating the Thermal Resistance of Foamed Polyethylene with Reflective Heat Insulation Made of Aluminum Foil

To ensure energy savings in buildings, it is advisable to use effective thermal insulation materials, materials with a low radiation coefficient in particular. Such building materials include multilayer materials made of foamed polyethylene with reflective heat insulation made of aluminum foil located between the layers of foam polyethylene. Currently, the assessment of thermal insulation characteristics of such materials – thermal resistance and thermal conductivity is carried out only experimentally. The article presents a developed calculation method for determining the thermal resistance of multilayer polyethylene foam with reflective insulation made of aluminum foil between the layers, which takes into account both the transfer of heat in the material due to the thermal conductivity process and due to radiation. Studies of samples of multilayer material of different thickness by experimental and computational methods are presented. Comparison of the thermal resistance values obtained by various methods showed good convergence, which makes it possible to use the developed calculation method for calculating the thermal resistance of samples made of low-density foam polyethylene with reflective insulation made of aluminum foil. Research conducted has also confirmed that foamed polyethylene with reflective insulation made of aluminum foil between layers of polyethylene foam is an effective thermal insulation material.

Keywords: polyethylene foam, reflective heat insulation, thermal resistance, calculation method.

For citation: Umnyakova N.P. Method for evaluating the thermal resistance of foamed polyethylene with reflective heat insulation made of aluminum foil. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 44–49. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-44-49>

Строительные материалы являются пористыми телами. Пористость материала определяется процентным содержанием в нем пор и представляет собой процентное отношение объема пор к его общему объему. Пористость материала зависит от плотности. Для эффективных теплоизоляционных материалов, таких как минераловатные и пенопласты, плотность которых изменяется от 20 до 40 кг/м³, пористость достигает 98%. К таким материалам, имеющим высокую пористость, можно отнести вспененный полиэтилен плотностью 26–32 кг/м³, который выпускается рядом отечественных пред-

приятий. Для повышения его теплотехнических свойств между слоями вспененного полиэтилена толщиной 3,5–4 мм устраивается слой отражательной теплоизоляции из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм, который склеивается с основанием тонким слоем расплавленного полиэтилена. В результате получается эффективный многослойный теплоизоляционный материал из вспененного полиэтилена и алюминиевой фольги толщиной от 8 до 32 мм. Отражательная теплоизоляция повышает теплозащитные качества материалов [1–5], что подтверждено рядом исследований [6–11].

Материалы и методы исследования

Для оценки термического сопротивления многослойного теплоизоляционного материала из вспененного полиэтилена и алюминиевой фольги были проведены лабораторные теплотехнические испытания образцов материала размером 250×250 мм. Толщина материала составляла 8; 16; 24 и 32 мм. Все образцы испытывались при средней температуре 25°C при величине температурного перепада между холодной и теплой пластинами прибора 5°C.

Обсуждение результатов

В результате проведенных исследований было получено следующее: среднее значение термического сопротивления многослойного образца на основе вспененного полиэтилена с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги толщиной 8 мм колебалось от 0,22 до 0,24 Вт/(м²·°C), многослойного образца толщиной 16 мм – от 0,4 до 0,44 Вт/(м²·°C), многослойного образца толщиной 24 мм от 0,58 – до 0,73 Вт/(м²·°C) и многослойного образца толщиной 32 мм – от 0,91 Вт/(м²·°C). Также средняя плотность образцов колебалась в диапазоне 35,48–37,24 кг/м³.

Результаты определения термического сопротивления и эквивалентного коэффициента теплопроводности образцов многослойного материала на основе вспененного полиэтилена и фольги, расположенной между слоями полиэтилена толщиной 8; 16; 24 и 32 мм, приведены в табл. 1.

С учетом ряда допущений проведем определение термического сопротивления расчетным путем. Для этого, базируясь на исследованиях К.Ф. Фокина [4], принимаем, что в порах строительных материалов передача теплоты происходит так же, как и в воздушных прослойках. Учитывая, что плотность вспененного полиэтилена, как уже отмечалось, очень малая и пористость достигает 98%, с достаточной степенью точности можно предположить, что этот материал толщиной 3,5–4 мм можно рассматривать как воздушную прослойку такой же толщины. Тогда условия теплопередачи в материале на основе вспененного полиэтилена, находящегося между отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги, можно рассматривать как воздушную прослойку с плоскопараллельными поверхностями: ее поверхностями будет

вспененный полиэтилен с внешних сторон и отражательная теплоизоляция из алюминиевой фольги.

Для определения коэффициента излучения поверхности вспененного полиэтилена воспользуемся исследованиями конструкций в климатических камерах НИИСФ РААСН [12], согласно которым коэффициент излучения вспененного полиэтилена можно принять $C_{впэ}=5,24$ Вт/(м²·К⁴).

Плоская поверхность отражательной теплоизоляции из алюминиевой фольги вплотную прилегает к порам скелета вспененного полиэтилена и находящегося в них воздуха. Поэтому при определении коэффициента излучения этих поверхностей примем данную величину по аналогии с сильно окисленной и шероховатой поверхностями $C_{отр.ф}=1,3$ Вт/(м²·К⁴).

Известно, что если произведение критериев Грасгофа Gr на критерий Прандтля Pr – $Gr \cdot Pr < 1000$, то теплопередача в воздушной прослойке обусловлена только теплопроводностью.

Значение критерия Грасгофа вычисляется по формуле $Gr = g\beta\Delta t\delta^3/\nu^2$. При вычислении критерия Gr за определяющий размер принимается толщина воздушной прослойки δ и за температуру – средняя температура между двумя поверхностями $t = 0,5(\tau_1 - \tau_2)$; Δt – перепад температуры на поверхностях образца эффективной теплоизоляции. При определении составляющих критерия Грасгофа коэффициент объемного расширения $\beta = 1/275,5$; толщина воздушной прослойки $\delta = 3,5 - 4 \cdot 10^{-3}$ м; температурный перепад $\Delta t = 2,5^\circ\text{C}$; кинематическая вязкость $\nu = 15,53 \cdot 10^{-6}$ м²/с; ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с². Критерий Прандтля равен 0,703, тогда получим:

$$Gr \cdot Pr = \frac{9,81 \cdot 3,75 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5}{275,5 \cdot 15,53 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,703 = 16,12.$$

Поэтому процесс передачи теплоты в элементе эффективной теплоизоляции с отражательной теплоизоляцией средней толщиной $\delta_{ср} = 3,75$ мм можно записать:

$$Q = \frac{\lambda_{ср}}{\delta_{ср}} (\tau_1 - \tau_2), \quad (1)$$

где $\lambda_{ср}$ – средняя величина коэффициента теплопроводности воздуха.

Таблица 1
Table 1

Теплотехнические показатели образцов эффективной теплоизоляции из вспененного полиэтилена и отражательной теплоизоляции из алюминиевой фольги
Thermal performance characteristics of samples of effective thermal insulation from foamed polyethylene and reflective thermal insulation from aluminum foil

Многослойный материал на основе вспененного полиэтилена и алюминиевой фольги, расположенной между слоями полиэтилена	Характеристика материала		
	Плотность материала образцов, кг/м ³	Термическое сопротивление, м ² ·°C/Вт	Эквивалентная теплопроводность, м·°C/Вт
Общей толщиной 8 мм	36,78	0,23	0,03478
Общей толщиной 16 мм	37,24	0,44	0,03721
Общей толщиной 24 мм	35,48	0,64	0,0363
Общей толщиной 32 мм	37,16	0,91	0,03516

Таблица 2
Table 2

Теплотехнические характеристики воздуха
Thermal characteristics of air

Температура, °С	Плотность γ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м ² ·°С)
0	1,297	0,0244
10	1,247	0,0251
20	1,205	0,0259
30	1,165	0,0267

Поскольку имеется разность температуры на противоположных сторонах теплоизоляции $\tau_1 - \tau_2$, то между поверхностями вспененного полиэтилена и отражательной теплоизоляции из алюминиевой фольги, а также склеенной тонкой прозрачной поверхностью происходит передача теплоты излучением.

Общее количество теплоты Q_0 , проходящей через конструкцию, состоящую из элементов эффективной теплоизоляции с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги, происходит теплопроводностью $Q_{теп}$ и излучением $Q_{из}$:

$$Q_0 = Q_{теп} + Q_{из}. \quad (2)$$

Образец эффективной теплоизоляции, имеющий толщину $\delta_{эт} = 8$ мм, состоит из двух воздушных прослоек толщиной $\delta_{эт1}$ и $\delta_{эт2}$, каждая толщиной по 3,75 мм, и одного слоя отражательной теплоизоляции из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм. Их коэффициент теплопроводности равен $\lambda_{эт1}$ и $\lambda_{эт2}$. Принимается в зависимости от средней температуры элемента (табл. 2).

Величина теплового потока $Q_{эт}$, проходящего через элементы эффективной теплоизоляции образца, характеризуется двумя уравнениями:

$$Q = \frac{\lambda_{эт1}}{\delta_{эт1}} (\tau_{эт1} - \tau_{этф}) \quad \text{или} \quad (\tau_{эт1} - \tau_{этф}) = \frac{Q_{эт} \delta_{эт1}}{\lambda_{эт1}} \quad (3)$$

или

$$Q = \frac{\lambda_{эт2}}{\delta_{эт2}} (\tau_{этф} - \tau_{эт2}) \quad \text{или} \quad (\tau_{этф} - \tau_{эт2}) = \frac{Q_{эт} \delta_{эт2}}{\lambda_{эт2}}. \quad (4)$$

Складывая уравнения (3) и (4), получим формулу (5) для определения передачи теплоты теплопроводностью $Q_{теп}$ элемента эффективной теплоизоляции с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги:

$$Q_{теп} = \frac{(\tau_{эт1} - \tau_{эт2})}{\frac{\delta_{эт1}}{\lambda_{эт1}} + \frac{\delta_{эт2}}{\delta_{эт2}}}, \quad (5)$$

где $\tau_{эт1}$, $\tau_{эт2}$ и $\tau_{этф}$ – температуры на поверхностях элемента эффективной теплоизоляции и на отражательной теплоизоляции из алюминиевой фольги, °С.

Величину теплового потока, проходящего излучением $Q_{из}$ через слои элемента эффективной теплоизоляции с двумя воздушными прослойками и одного слоя отражательной теплоизоляции, представим двумя уравнениями:

$$Q_{из} = \frac{1}{\frac{1}{C_{впэ}} + \frac{1}{C_{отр.ф}} - \frac{1}{C_0}} \left[\left(\frac{T_{эт1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{этф}}{100} \right)^4 \right],$$

или

$$\left[\left(\frac{T_{эт1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{этф}}{100} \right)^4 \right] = Q_{из} \left(\frac{1}{C_{впэ}} + \frac{1}{C_{отр.ф}} - \frac{1}{C_0} \right). \quad (6)$$

$$Q_{из} = \frac{1}{\frac{1}{C_{отр.ф}} + \frac{1}{C_{впэ}} - \frac{1}{C_0}} \left[\left(\frac{T_{отр.ф}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{эт2}}{100} \right)^4 \right],$$

или

$$\left[\left(\frac{T_{отр.ф}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{эт2}}{100} \right)^4 \right] = Q_{из} \left(\frac{1}{C_{отр.ф}} + \frac{1}{C_{эт2}} - \frac{1}{C_0} \right). \quad (7)$$

Складывая уравнения (6) и (7), получим формулу определения теплопередачи излучением элемента эффективной теплоизоляции с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги (8):

$$Q_{из} = \frac{\left(\frac{T_{эт1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{эт2}}{100} \right)^4}{\left(\frac{1}{C_{эт1}} + \frac{1}{C_{отр.ф}} - \frac{1}{C_0} \right) + \left(\frac{1}{C_{отр.ф}} + \frac{1}{C_{эт2}} - \frac{1}{C_0} \right)}. \quad (8)$$

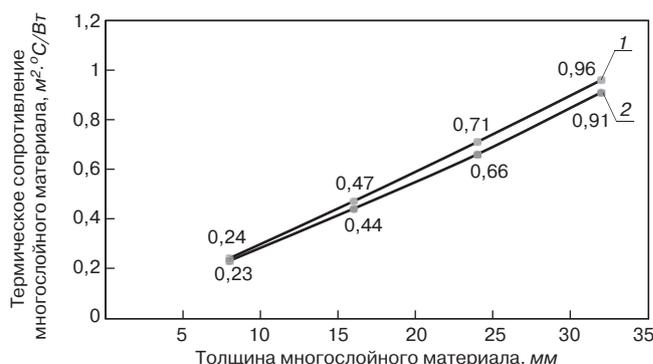
Термическое сопротивление элемента эффективной теплоизоляции с отражательной теплоизоляцией определим по формуле:

$$R = \frac{(\tau_{эт1} - \tau_{эт2})}{Q_{теп} + Q_{из}}. \quad (9)$$

Для элемента эффективной теплоизоляции с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги толщиной 8 мм сделаем расчет по определению термического сопротивления при разности температуры $\tau_{эт1} = 27,5^\circ\text{C}$ и $\tau_{эт2} = 22,5^\circ\text{C}$.

Передачу теплоты теплопроводностью найдем по формуле (5):

$$Q_{теп} = \frac{27,5 - 22,5}{\frac{0,00375}{0,02611} + \frac{0,00375}{0,02625}} = \frac{5}{0,144 + 0,143} = 17,42 \text{ Вт/м}^2.$$



Термическое сопротивление многослойных образцов из вспененного полиэтилена с отражательной теплоизоляцией, полученное расчетным и экспериментальным путем: 1 – расчетные значения при наличии отражательной теплоизоляции из алюминиевой фольги; 2 – экспериментальные значения при наличии отражательной теплоизоляции из алюминиевой фольги

Thermal resistance of multilayer samples of foamed polyethylene with reflective thermal insulation, obtained by calculation and experimentally: 1 – calculated values in the presence of reflective thermal insulation from aluminum foil; 2 – experimental values in the presence of reflective thermal insulation from aluminum foil

Передачу теплоты излучением найдем по формуле (8):

$$Q_{\text{из}} = \frac{\left(\frac{27,5+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{22,5+273}{100}\right)^4}{\left(\frac{1}{5,24} + \frac{1}{1,3} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{1,3} + \frac{1}{5,24} - \frac{1}{5,76}\right)} = \frac{5,292}{0,786+0,786} = 3,366 \text{ Вт/м}^2.$$

Термическое сопротивление определим по формуле (9):

$$R = \frac{27,5-22,5}{17,42+3,36} = \frac{5}{20,78} = 0,24 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Полученное расчетом термическое сопротивление $0,24 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ практически совпадает со средним термическим сопротивлением, полученным

экспериментальным путем, равным $0,23 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$. Погрешность составляет $4,3\%$.

Для конструкции, состоящей из двух элементов эффективной теплоизоляции с отражательной теплоизоляцией и алюминиевой фольги общей толщиной 16 мм передачу теплоты теплопроводностью определим по формуле:

$$Q_{\text{теп}} = \frac{(\tau_{\text{эт1}} - \tau_{\text{эт4}})}{\left(\frac{\delta_{\text{эт1}}}{\lambda_{\text{эт1}}} + \frac{\delta_{\text{эт2}}}{\delta_{\text{эт2}}}\right) + \left(\frac{\delta_{\text{эт3}}}{\lambda_{\text{эт3}}} + \frac{\delta_{\text{эт4}}}{\delta_{\text{эт4}}}\right)} = \frac{27,5-22,5}{\left(\frac{0,00375}{0,02611} + \frac{0,00375}{0,02625}\right) + \left(\frac{0,00375}{0,02635} + \frac{0,00375}{0,02645}\right)} = 8,8 \text{ Вт/м}^2.$$

Передачу теплоты излучением определим по формуле (8):

$$Q_{\text{из}} = \frac{\left(\frac{T_{\text{эт1}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{эт4}}}{100}\right)^4}{\left(\frac{1}{C_{\text{эт}}} + \frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} + \frac{1}{C_{\text{эт}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{эт}}} + \frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} + \frac{1}{C_{\text{эт}}} - \frac{1}{C_0}\right)} = \frac{\left(\frac{27,5+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{22,5+273}{100}\right)^4}{\left(\frac{1}{5,24} + \frac{1}{1,3} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{1,3} + \frac{1}{5,24} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{5,24} + \frac{1}{1,3} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{1,3} + \frac{1}{5,24} - \frac{1}{5,76}\right)} = \frac{5,292}{0,786+0,786+0,786+0,786} = \frac{5,292}{3,144} = 1,68 \text{ Вт/м}^2.$$

Термическое сопротивление определим по формуле (9):

$$R = \frac{27,5-22,5}{8,8+1,68} = \frac{5}{10,48} = 0,47 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Полученное расчетом термическое сопротивление $0,47 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ достаточно близко совпадает со средним термическим сопротивлением, полученным экспериментальным путем, $0,43 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, погрешность расчета $9,3\%$.

Для конструкции, состоящей из трех слоев элементов эффективной теплоизоляции с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги толщиной 24 мм , передачу теплоты теплопроводностью определим по формуле:

$$Q_{\text{теп}} = \frac{(\tau_{\text{эт1}} - \tau_{\text{эт6}})}{\left(\frac{\delta_{\text{эт1}}}{\lambda_{\text{эт1}}} + \frac{\delta_{\text{эт2}}}{\delta_{\text{эт2}}}\right) + \left(\frac{\delta_{\text{эт3}}}{\lambda_{\text{эт3}}} + \frac{\delta_{\text{эт4}}}{\delta_{\text{эт4}}}\right) + \left(\frac{\delta_{\text{эт5}}}{\lambda_{\text{эт5}}} + \frac{\delta_{\text{эт6}}}{\delta_{\text{эт6}}}\right)} = \frac{27,5-22,5}{\left(\frac{0,00375}{0,02648} + \frac{0,00375}{0,02643}\right) + \left(\frac{0,00375}{0,02637} + \frac{0,00375}{0,02623}\right) + \left(\frac{0,00375}{0,02620} + \frac{0,00375}{0,02612}\right)} = 5,84 \text{ Вт/м}^2.$$

Передачу теплоты излучением определим по формуле:

$$Q_{\text{из}} = \frac{\left(\frac{T_{\text{эт1}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{эт6}}}{100}\right)^4}{\left(\frac{1}{C_{\text{эт}}} + \frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} + \frac{1}{C_{\text{эт}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{эт}}} + \frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} + \frac{1}{C_{\text{эт}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{эт}}} + \frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} + \frac{1}{C_{\text{эт}}} - \frac{1}{C_0}\right)} = \frac{\left(\frac{27,5+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{22,5+273}{100}\right)^4}{\left(\frac{1}{5,24} + \frac{1}{1,3} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{1,3} + \frac{1}{5,24} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{5,24} + \frac{1}{1,3} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{1,3} + \frac{1}{5,24} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{5,24} + \frac{1}{1,3} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{1,3} + \frac{1}{5,24} - \frac{1}{5,76}\right)} = \frac{5,292}{0,786+0,786+0,786+0,786+0,786+0,786} = \frac{5,292}{4,716} = 1,12 \text{ Вт/м}^2.$$

Термическое сопротивление определим по формуле (9):

$$R = \frac{27,5-22,5}{5,84+1,12} = \frac{5}{6,837} = 0,71 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Полученное расчетом термическое сопротивление 0,71 м²·°C/Вт несколько выше среднего термического сопротивления, полученного экспериментальным путем, 0,66 м²·°C/Вт, погрешность расчета составляет 7,57%.

Для конструкции, состоящей из четырех слоев элементов эффективной теплоизоляции с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги толщиной 32 мм, передачу теплоты теплопроводностью определим по формуле:

$$Q_{\text{теп}} = \frac{(t_{\text{эт1}} - t_{\text{эт8}})}{\left(\frac{\delta_{\text{эт1}}}{\lambda_{\text{эт1}}} + \frac{\delta_{\text{эт2}}}{\delta_{\text{эт2}}}\right) + \left(\frac{\delta_{\text{эт3}}}{\lambda_{\text{эт3}}} + \frac{\delta_{\text{эт4}}}{\delta_{\text{эт4}}}\right) + \left(\frac{\delta_{\text{эт5}}}{\lambda_{\text{эт5}}} + \frac{\delta_{\text{эт6}}}{\delta_{\text{эт6}}}\right) + \left(\frac{\delta_{\text{эт7}}}{\lambda_{\text{эт7}}} + \frac{\delta_{\text{эт8}}}{\delta_{\text{эт8}}}\right)} =$$

$$= \frac{27,5-22,5}{\left(\frac{0,00375}{0,02612} + \frac{0,00375}{0,02618}\right) + \left(\frac{0,00375}{0,02623} + \frac{0,00375}{0,02628}\right) + \left(\frac{0,00375}{0,02632} + \frac{0,00375}{0,02638}\right) + \left(\frac{0,00375}{0,02642} + \frac{0,00375}{0,02648}\right)} = 4,4 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Передачу теплоты излучением определим по формуле:

$$Q_{\text{из}} = \frac{\left(\frac{T_{\text{эт1}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{эт8}}}{100}\right)^4}{\left(\frac{1}{C_{\text{эт}}} + \frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} + \frac{1}{C_{\text{эт}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{эт}}} + \frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} + \frac{1}{C_{\text{эт}}} - \frac{1}{C_0}\right) +$$

$$+ \left(\frac{1}{C_{\text{эт}}} + \frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} + \frac{1}{C_{\text{эт}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{эт}}} + \frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} - \frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{C_{\text{отр.ф}}} + \frac{1}{C_{\text{эт}}} - \frac{1}{C_0}\right)} =$$

$$= \frac{\left(\frac{27,5+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{22,5+273}{100}\right)^4}{\left(\frac{1}{5,24} + \frac{1}{1,3} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{1,3} + \frac{1}{5,24} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{5,24} + \frac{1}{1,3} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{1,3} + \frac{1}{5,24} - \frac{1}{5,76}\right) +$$

$$+ \left(\frac{1}{5,24} + \frac{1}{1,3} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{1,3} + \frac{1}{5,24} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{5,24} + \frac{1}{1,3} - \frac{1}{5,76}\right) + \left(\frac{1}{1,3} + \frac{1}{5,24} - \frac{1}{5,76}\right)} =$$

$$= \frac{5,292}{0,786+0,786+0,786+0,786+0,786+0,786+0,786+0,786} = \frac{5}{6,29} = 0,795 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Термическое сопротивление определим по формуле:

$$R = \frac{27,5-22,5}{4,4+0,795} = \frac{5}{5,195} = 0,96 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Полученное расчетом термическое сопротивление 0,96 м²·°C/Вт практически равно среднему термическому сопротивлению, полученному экспериментальным путем, 0,91 м²·°C/Вт, погрешность составила 5,49%.

На рисунке приведены графики изменения термического сопротивления многослойного материала из вспененного полиэтилена с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги между слоями, полученные экспериментальным (1) и расчетным (2) путем по приведенной в статье методике.

Список литературы

1. Ахременков А.А., Кузьмин В.А., Цирлин А.М., Цыганков В.М. Энергетическая эффективность покрытия внутренней поверхности помещения отражательной теплоизоляцией // *Строительные материалы*. 2013. № 12. С. 65–67.

Выводы

Таким образом, разработанная методика расчета термического сопротивления позволила получить его численные значения для многослойного материала из вспененного полиэтилена с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги, имеющие сходимость с экспериментальными результатами. Все это показывает, что исследуемый материал из слоев вспененного полиэтилена с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги, расположенной между слоями, является эффективным теплоизоляционным материалом.

References

1. Akhremenkov A.A., Kuzmin V.A., Tsirlin A.M., Tsyganov V.M. Energy efficiency of coating the inner surface of premises with reflective heat insulation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 12, pp. 65–67. (In Russian).

2. Ujma F., Umnyakova N. Thermal efficiency of the building envelope with the air layer and reflective coatings // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 100. 00082. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910000082>
3. Umnyakova N. Influence of surface emissivity on the heat loss through the wall behind the heater // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 111, pp. 797–802. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.148>
4. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / Под ред. Ю.А. Табуншикова, В.Г. Гагарина. 5-е изд., пересмотр. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.
5. Умнякова Н.П. Теплопередача через ограждающие конструкции с учетом коэффициентов излучения внутренних поверхностей помещения // *Жилищное строительство*. 2014. № 6. С. 14–17.
6. Вытчиков Ю.Е., Сапоров М.Е. Исследование теплозащитных характеристик замкнутых воздушных прослоек в строительных ограждающих конструкциях с применением экранной теплоизоляции // *Вестник СТАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2014. № 1 (14). С. 98–102.
7. Жунь Г.Г. Исследования экранно-вакуумной теплоизоляции с новыми материалами // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2012. № 8 (102). С. 59–63
8. Кузьмин В.А. Исследование возможностей применения отражательной теплоизоляции в многослойных сэндвич-панелях с учетом многократного отражения // *Строительные материалы*. 2017. № 6. С. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-749-6-35-40>.
9. Мананков В.М. Отражающая теплоизоляция в энергосберегающем строительстве // *Вестник МГСУ*. 2011. № 3. С. 319–326.
10. Мансуров Р.Ш., Федорова Н.Н., Ефимов Д.И., Косова Е.Ю. Математическое моделирование теплотехнических характеристик наружных ограждений с воздушными прослойками // *Инженерно-физический журнал*. 2018. Т. 91. № 5. С. 1287–1293.
11. Умнякова Н.П. Теплозащита замкнутых воздушных прослоек с отражательной теплоизоляцией // *Жилищное строительство*. 2014. № 1–2. С. 16–20.
12. Фокин В.М., Лепилов В.И. Исследования температуропроводности при нагреве систем с многослойным экранированием // *Интернет-вестник ВолгГАСУ. Политетамическая серия*. 2007. Вып. 2 (3).
13. Умнякова Н.П., Цыганков В.М., Кузьмин В.А. Экспериментальные теплотехнические исследования для рационального проектирования стеновых конструкций с отражательной теплоизоляцией // *Жилищное строительство*. 2017. № 1–2. С. 38–42. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2018-1-2-38-42>
2. Ujma F., Umnyakova N. Thermal efficiency of the building envelope with the air layer and reflective coatings. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 100. 00082. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910000082>
3. Umnyakova N. Influence of surface emissivity on the heat loss through the wall behind the heater. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 111, pp. 797–802. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.148>
4. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ogradhdayushchikh chastei zdaniy. Pod red. Yu.A. Tabunshchikova, V.G. Gagarina [Construction heat engineering of enclosing parts of buildings / Edited by Yu.A. Tabunshchikova, V.G. Gagarin]. Moscow. AVOK-PRESS. 2006. 256 p.
5. Umnyakova N.P. Heat transfer through enclosing structures with due regard for coefficients of radiation of inner surfaces of premises. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 6, pp. 14–17. (In Russian).
6. Vytchikov Yu.E., Saporev M.E. Study of the heat-shielding characteristics of enclosed air spaces in building envelopes using screen thermal insulation. *Vestnik STASU. Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2014. No. 1 (14), pp. 98–102. (In Russian).
7. Zhun G.G. Research on screen-vacuum thermal insulation with new materials. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit*. 2012. No. 8 (102), pp. 59–63. (In Russian).
8. Kuzmin V.A. Research in possibilities to use reflective heat insulation in multi-layer sandwich-panels with due regard for multiple reflection. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 6, pp. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-749-6-35-40>. (In Russian).
9. Manankov V.M. Reflective thermal insulation in energy-efficient construction. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 3, pp. 319–326. (In Russian).
10. Mansurov R.Sh., Fedorova N.N., Efimov D.I., Kosova E.Yu. Mathematical modeling of the thermo-technical characteristics of exterior fencing with air gaps. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2018. Vol. 91. No. 5, pp. 1287–1293. (In Russian)
11. Umnyakova N.P. Heat protection of closed air spaces with reflective insulation. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 1–2, pp. 16–20. (In Russian).
12. Fokin V.M., Lepilov V.I. Thermal diffusivity studies when heating systems with multilayer shielding. *Internet-vestnik VolgGASU. Politetamicheskaya seriya*. 2007. Vol. 2 (3). (In Russian).
13. Umnyakova N.P., Tsygankov V.M., Kuzmin V.A. Experimental heat engineering studies for rational design of wall structures with reflecting heat insulation. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2017. No. 1–2, pp. 38–42. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2018-1-2-38-42>

М.Ю. ЛЕШКО¹, инженер (mleshko@yandex.ru), А.В. СИДОРИНА¹, инженер (anna_sidorina@mail.ru);
А.В. ВАРГАСОВ², инженер (avargasov@gskb.ru), П.А. КОЩЕЕВ², инженер (pkosheev@gskb.ru)

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

² Научно-производственное объединение «Алмаз» им. академика А.А. Расплетина (127411, г. Москва, Дмитровское ш., 110)

Использование эластомеров в качестве звукопоглощающих материалов в глушителях шума вентиляционных систем

Рассматриваются существующие глушители аэродинамического шума для систем вентиляции и кондиционирования воздуха и используемые в них звукопоглощающие материалы (ЗПМ). В зависимости от конструктивных особенностей они подразделяются на пластинчатые, трубчатые, канальные и камерные, а также используемые в ряде случаев облицованные изнутри ЗПМ повороты и участки каналов, указываются их достоинства и недостатки. В частности, использование в качестве ЗПМ волокнистых материалов типа минеральной ваты или супертонкого стекловолокна требует применения в конструкции глушителей защитных покрытий, препятствующих выдуванию потоком воздуха таких материалов. Конструкция защитного покрытия представляет собой, как правило, перфорированный стальной лист или металлическую сетку и стеклоткань или стеклохолст. Такие конструкции достаточно сложны технологически, а кроме того, при длительной эксплуатации волокнистые ЗПМ имеют тенденцию к осыпанию под воздействием вибраций, вызванных потоком воздуха в местах установки глушителей, что приводит к резкому снижению их эффективности. Несколько обособленно стоят камерные глушители, но они применяются крайне редко из-за больших габаритов. К достоинствам таких глушителей следует отнести достаточно большую эффективность снижения шума, особенно если входное и выходное отверстия глушителей не осесимметричны. В настоящее время в рамках борьбы с шумом различного инженерного оборудования широкое распространение получили так называемые эластомерные материалы на основе нитрильного каучука. В основном эти материалы начали использовать в различных конструктивных системах звукоизоляции, но такие материалы можно использовать и в качестве звукопоглощающих, поскольку они имеют сравнительно высокие коэффициенты звукопоглощения. В частности, коэффициент звукопоглощения материала K-Fonik Open Cell-240 в частотном диапазоне начиная с 315 Гц составляет 0,4 и начинает повышаться, достигая от 800 до 1250 Гц – 0,95, а на более высоких частотах до 5000 Гц – в среднем 0,85. Эластомерные материалы по сравнению с волокнистыми имеют ряд преимуществ. Они не выдуваются потоком воздуха в каналах вентсистем и, следовательно, не требуют использования в конструкциях защитных слоев, устойчивы к воздействию вибраций и более технологичны при изготовлении. Тем не менее результаты акустических испытаний глушителя шума, пластины которого выполнены из эластомера K-Fonik Open Cell-240, показали его низкую эффективность. Приведенные решения позволили повысить ее за счет конструктивных изменений пластины.

Ключевые слова: шумозащита, глушители аэродинамического шума, волокнистые звукопоглощающие материалы, эластомерные материалы, качество воздуха, вентиляция.

Для цитирования: Лешко М.Ю., Сидорина А.В., Варгасов А.В., Кошчев П.А. Использование эластомеров в качестве звукопоглощающих материалов в глушителях шума вентиляционных систем // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 50–53.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-50-53>

M.Yu. LESHKO¹, Engineer (mleshko@yandex.ru), A.V. SIDORINA¹, Engineer (anna_sidorina@mail.ru), A.V. VARGASOV², Engineer (avargasov@gskb.ru), P.A. KOSHEEV², Engineer (pkosheev@gskb.ru)

¹ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivny Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

² Scientific and Production Association "Almaz" named after Academician A.A. Raspletin (110, Dmitrovskoe Highway, Moscow, 127411, Russian Federation)

Use Of Elastomers as Sound-Absorbing Materials in Silencers for Ventilation Systems

Existing silencers for aerodynamic noise for ventilation and air conditioning systems and the sound-absorbing materials (SPM) used in them are considered. Depending on the design features, they are divided into lamellar, tubular, channel and chamber, as well as the turns and sections of channels used inside the SPM, and their advantages and disadvantages are indicated. In particular, the use of fibrous materials such as mineral wool or superthin fiberglass as SPM requires the use of protective coatings in the design of silencers to prevent such materials from being blown out by the air stream. The design of the protective coating is usually a perforated steel sheet or metal mesh and fiberglass or fiberglass. Such constructions are quite technologically complicated, and besides this, during long-term operation, fibrous SPMs tend to fall off under the influence of vibrations caused by air flow in the places of installation of silencers, which leads to a sharp decrease in their effectiveness. Chamber silencers are somewhat detached, but they are used extremely rarely because of their large dimensions. The advantages of such silencers include a sufficiently large noise reduction efficiency, especially if the inlet and outlet openings of the silencers are not axisymmetric. Currently, in the framework of the fight against noise of various engineering equipment, the so-called elastomeric materials based on nitrile rubber are widely used. Basically, these materials began to be used in various structural sound insulation systems, but such materials can also be used as sound absorbing materials, since they have relatively high sound absorption coefficients. In particular, the sound absorption coefficient of the K-Fonik Open Cell-240 material in the frequency range starting from 315 Hz is 0.4 and begins to increase, reaching from 800 to 1250 Hz 0.95, and at higher frequencies up to 5000 Hz on average 0.85. Elastomeric materials have several advantages over fibrous materials. They are not blown by the air flow in the channels of the ventilation systems and, therefore, do not require the use of protective layers in the structures, are resistant to vibrations and are more technological in manufacturing. Nevertheless, the results of acoustic tests of a silencer, the plates of which are made of K-Fonik Open Cell-240 elastomer, showed its low efficiency. The above solutions allowed it to be significantly increased due to design changes of the plate.

Keywords: noise protection, aerodynamic noise silencers, fibrous sound-absorbing materials, elastomeric materials, air quality, ventilation.

For citation: Leshko M. Yu., Sidorina A.V., Vargasov A.V., Kosheev P. A. Use of elastomers as sound-absorbing materials in noise silencers of ventilation systems. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 50–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-50-53>

В практике снижения аэродинамического шума как вентиляционных установок, так и вентиляционных сетей используются глушители шума. В зависимости от конструктивных особенностей они подразделяются на пластинчатые, трубчатые и камерные. Также в ряде случаев используются облицованные изнутри звукопоглощающим материалом (ЗПМ) повороты и участки каналов [1–4]. Всем этим устройствам присущи как достоинства, так и недостатки.

Так, пластинчатые глушители в зависимости от толщины пластин и расстояний между ними высокоэффективны в широком диапазоне частот. В свою очередь, такие глушители имеют значительные габариты, поскольку из-за необходимости сохранения постоянной скорости воздушного потока в канале, где устанавливается такой глушитель, его поперечное сечение должно быть увеличено на величину свободного сечения (фактор свободной площади). Например, для пластинчатого глушителя шума с толщиной пластин 200 мм и расстоянием между пластинами 200 мм – фактор свободной площади 50%, его поперечный или вертикальный линейный размер должен быть увеличен вдвое [3, 4]. Пластины таких глушителей заполняются либо супертонким стекловолокном, либо минеральной ватой. В качестве защиты ЗПМ от выдувания потоком воздуха в процессе эксплуатации необходимо применять различные по конструкции защитные покрытия. Они, как правило, состоят или из стеклоткани, или из стеклохолстов и стеклобумаги, которые, в свою очередь, закрываются перфорированным металлическим листом или металлической сеткой [1, 2].

Трубчатые глушители представляют собой перфорированный металлический канал, закрытый металлическим кожухом, в котором находится волокнистый ЗПМ, аналогичный пластинчатому глушителю. Здесь также присутствует защитная конструкция. Такой глушитель не требует увеличения габаритов вентиляционного канала в месте его установки, поскольку их поперечные сечения совпадают. Толщина слоя ЗПМ в таких глушителях варьируется от 50 до 100 мм. К недостаткам этих глушителей следует отнести снижение их эффективности с увеличением внутренних размеров (диаметра, поперечных линейных размеров). Применение трубчатых глушителей нецелесообразно при размерах, превышающих 500 мм (линейных или диаметральных) [1, 4].

Камерные глушители применяются крайне редко из-за своих больших габаритов [1, 3]. Для увеличения их эффективности применяется облицовка внутренних поверхностей глушителей волокнистым ЗПМ, аналогичным вышеперечисленным глушителям. К достоинствам таких глушителей следует отнести достаточно большую эффективность снижения шума, особенно если входное и выходное отверстия глушителей не осесимметричны. Такие глушители (без облицовки ЗПМ) могут применяться в вытяжных системах вентиляции, обслуживающих вредные производства с наличием в удаляемом воз-

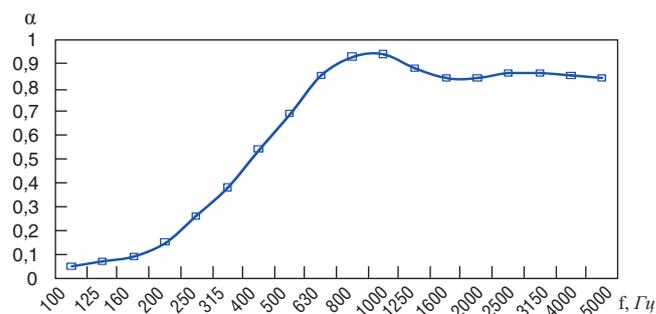


Рис. 1. Коэффициенты звукопоглощения материала K-Fonik Open Cell-240
Fig. 1. Sound absorption factors for K-Fonik Open Cell-240 material

духе кислот, щелочей, жира. В таких системах установка глушителей с волокнистыми ЗПМ крайне нецелесообразна, поскольку эффективность глушителей резко падает в процессе эксплуатации из-за адсорбции волокнами ЗПМ указанных загрязнителей, а очистка их невозможна.

Облицованные повороты и участки каналов представляют собой трубчатые глушители, как бы вывернутые наизнанку. Звукопоглощающая облицовка крепится внутри вентиляционного канала к его стенкам. В качестве ЗПМ используются волокнистые материалы, описанные ранее, а также применяется защитная конструкция. Толщина ЗПМ варьируется, как правило, от 50 до 100 мм. Совершенно естественно, что увеличение толщины ЗПМ соответствует большей эффективности снижения шума, при этом величины эффективности сдвигаются в область низкочастотного диапазона. Таким устройствам присущи те же достоинства и недостатки, что и трубчатым глушителям. Кроме того, поскольку в таких конструкциях существует резкое изменение поперечного сечения при переходе в облицованную часть канала и на выходе из него, аэродинамический коэффициент местного сопротивления может варьироваться от 0,15 до 1,5 единиц (без учета коэффициента сопротивления трения) в зависимости от соотношения поперечных сечений облицованной и необлицованной частей канала [5]. Такие устройства при значительных скоростях воздушного потока, проходящего через них, могут быть сами источниками повышенного шума.

Тем не менее, учитывая тенденцию экономии места в запотолочном пространстве при прокладке в нем не только вентиляционных сетей, но и других инженерных коммуникаций, например трубопроводов систем холодоснабжения и т. п., проектировщики вместо пластинчатых и трубчатых глушителей вынуждены использовать облицованные каналы и повороты, несмотря на их достаточно низкую эффективность.

Немаловажным фактором, влияющим на долговечность использования средств глушения шума, является устойчивость материалов к воздействию вибраций и разрушению поверхности абразивным потоком воздуха. ЗПМ на основе волокон со временем «выдуваются», воздушный поток переносит раз-

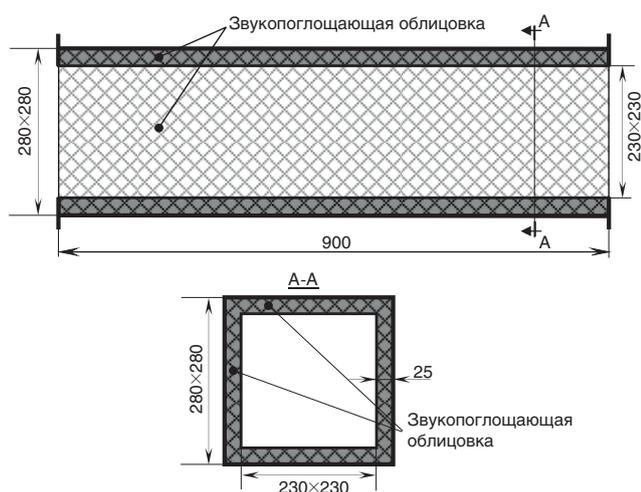


Рис. 2. Испытанный трубчатый глушитель шума
Fig. 2. Tested tubular silencer

рушающиеся частицы материала, оседающего как на поверхностях, так и в легких человека.

В настоящее время в рамках борьбы с шумом различного инженерного оборудования широкое распространение получили так называемые эластомерные материалы [6–8] на основе нитрильного каучука, значительно меньше подверженные разрушению вибрациями и «выдуванию». В основном эти материалы начали использовать в различных конструктивных системах звукоизоляции [9] (перегородки, кожухи, «плавающие» полы и т. д.). Но такие материалы можно использовать и в качестве звукопоглощающих, поскольку они имеют сравнительно высокие коэффициенты звукопоглощения (α). В качестве примера на рис. 1 приведены коэффициенты звукопоглощения материала K-Fonik Open Cell-240 в частотном диапазоне от 100 до 5000 Гц.

Материал с такими коэффициентами можно использовать в пластинчатых глушителях в качестве звукопоглощающих пластин [10], в трубчатых глушителях как звукопоглощающий слой и в качестве внутренних облицовок в поворотах и участках каналов. Такие материалы по сравнению с волокнистыми имеют ряд преимуществ. Во-первых, они не выдуваются потоком воздуха в каналах вентсистем и, следовательно, не требуют использования в конструкциях защитных слоев, препятствующие их переносу разрушающихся частиц волокнистых ЗПМ в окружающее пространство. Во-вторых, они более технологичны при изготовлении. Немаловажным фактором, влияющим на долговечность использования таких средств глушения шума, является устойчивость данных материалов к воздействию вибраций.

Для определения эффективности использования эластомерных материалов в качестве звукопоглотителей в НИИ строительной физики РААСН были проведены акустические испытания трубчатого глушителя шума со звукопоглощающим материалом — эластомером K-Fonik Open Cell-240 толщиной 25 мм на аэроакустическом стенде по методике, отвечающей требованиям национального ГОСТ 28100–89 «Глушители

шума. Методы определения акустических характеристик», межгосударственного ГОСТ 28100–2007 (ИСО 7235:2003) «Измерения лабораторные для заглушающих устройств, устанавливаемых в воздуховодах, и воздухораспределительного оборудования».

Глушитель представлял собой квадратный вентиляционный канал сечением 280×280 мм, длиной 900 мм, облицованный изнутри звукопоглощающим эластомерным материалом.

Конструктивные параметры такого глушителя представлены на рис. 2.

Как было указано, использованный в конструкции глушителя в качестве звукопоглощающего материала эластомер имеет перед волокнистыми материалами важное преимущество: для него не требуется защитный слой из стеклоткани и перфорированного металлического листа, поскольку из-за своей плотной структуры не выдувается потоком воздуха.

Толщина слоя ЗПМ соответствовала толщине выпускаемого промышленностью эластомерного листового материала.

Как показали проведенные испытания, эластомерный материал малопримогоден в качестве звукопоглощающего материала в представленной конструкции глушителя, поскольку эффективность такого глушителя весьма низкая во всем диапазоне частот (рис. 3).

Эта низкая эффективность может быть связана с достаточно высокой плотностью материала эластомера и тонким слоем. Следует отметить, что у волокнистых материалов (различных минеральных ват), широко применяемых во всех типах абсорбционных глушителей, свойства поглощения звука при такой толщине слоя также невысокие, поэтому их эффективность мало отличается от эффективности испытанного глушителя. Однако при увеличении слоя волокнистого ЗПМ она существенно повышается.

В данном случае увеличение толщины слоя не приведет к ожидаемому результату, поскольку и плотность эластомерного материала более высокая, и количество сквозных пор, с наличием которых поглощающие свойства повышаются, минимально по сравнению с классическими звукопоглощающими

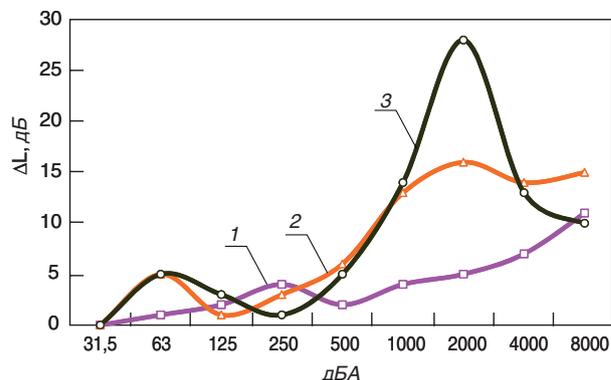


Рис. 3. Эффективность испытанного трубчатого глушителя: 1 – гладкая облицовка; 2 – облицовка с узкими прорезями; 3 – облицовка с П-образными прорезями
Fig. 3. The effectiveness of the tested tubular silencer: 1 – smooth facing; 2 – facing with narrow slots; 3 – facing with П-shaped slots

материалами. Однако для него в отличие от волокнистых материалов существует не менее эффективный способ повышения звукопоглощающих свойств: увеличение площади звукопоглощающей поверхности слоя.

Для этого в листовых пластинах поглотителя сначала были выполнены узкие прорезы шириной 3 мм и глубиной 12 мм [10], а затем прорезы П-образной формы шириной 10 мм и глубиной 12 мм.

Полученные результаты представлены на рис. 3.

За счет увеличения площади звукопоглощающей поверхности эластомера значительно повы-

шается эффективность глушителя в диапазоне частот от 500 Гц и выше. В данном диапазоне она сравнима с эффективностью трубчатых глушителей с соответствующими размерами свободного сечения.

Несмотря на довольно скромную эффективность, можно заключить, что к данной конструкции будет проявлен не только научный, но и практический интерес. Он пригоден прежде всего в тех случаях, когда требуется снизить шум вентилятора, спектральный состав которого коррелируется с частотно-зависимой эффективностью.

Список литературы

1. Борьба с шумом на производстве: Справочник / Под общей ред. Е.Я. Юдина. М.: Машиностроение. 1985, 400 с.
2. Осипов Г.Л. Защита зданий от шума. М.: Стройиздат, 1972. 214 с.
3. Гусев В.П., Леденев В.И., Лешко М.Ю. Расчет и проектирование шумоглушения систем вентиляции, кондиционирования воздуха и воздушного отопления: Справочное пособие. Под ред. И.Л. Шубина. М.: НИИСФ РААСН, 2013. 80 с.
4. Гусев В.П. Акустические характеристики абсорбционных глушителей для защиты зданий и территорий застройки от вентиляционного шума // *Безопасность жизнедеятельности*. 2003. № 3. С. 53–59.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
6. Гусев В.П., Сидорина А.В. Изоляция шума воздуховодов систем вентиляции покрытиями с использованием эластомерных и волокнистых материалов // *Строительные материалы*. 2013. № 6. С. 37–39.
7. Гусев В.П., Лешко М.Ю., Сидорина А.В. Защита от воздушного шума элементов систем вентиляции и кондиционирования воздуха. *Труды конференции – IV академических чтений «Актуальные вопросы строительной физики: энергосбережение, надежность, экологическая безопасность», посвященных памяти Г.Л. Осипова*. Москва, 3–5 июля, 2012.
8. Гусев В.П., Лешко М.Ю., Сидорина А.В. Акустические характеристики покрытий на воздуховоды и технологические трубопроводы // *Строительные материалы*. 2015. № 6. С. 35–38.
9. Гусев В.П., Сидорина А.В. Расчет и проектирование защиты от шума транзитных воздуховодов систем ОВК // *АВОК*. 2013. № 2. С. 94–100.
10. Заявка № 2019129868 Пластины бескаркасного типа из вспененного эластичного полимера на основе нитрильного каучука для вентиляционных глушителей шума. Гусев В.П., Лешко М.Ю., Лукьянова А.В., Сидорина А.В., Шайхутдинова Н.Ю. 27.06.2019.

References

1. Bor'ba s шумом na proizvodstve. Spravochnik. Pod obshchei redaktsiei E.Ya. Yudina. [Control of noise in the workplace. Guide. Under the general editorship of E.Ya. Yudin]. Moscow: Mashinostroenie. 1985. 400 p.
2. Osipov G.L. Zashchita zdaniy ot shuma [Protection of buildings from noise] Moscow: Stroyizdat. 1972. 214 p.
3. Gusev V.P., Ledenev V.I., Leshko M.Yu. Raschet i proektirovanie shumoglusheniya sistem ventilyatsii, konditsionirovaniya vozdukha i vozdushnogo otopeniya. Spravochnoe posobie pod redaktsiei Shubina I.L. [Calculation and design of noise attenuation of ventilation, air conditioning and air heating systems. Reference guide edited by I.L. Shubin] Moscow: NIISF RAASN. 2013. 80 p.
4. Gusev V.P. Acoustic characteristics of absorption silencers to protect buildings and territories from ventilation noise. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2003. No. 3, pp. 53–59. (In Russian).
5. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. Pod red. M.O. Shteinberg.. [Handbook of hydraulic resistances. Under the editorship of M.O. Steinberg]. Moscow: Mashinostroenie. 1992. 672 p.
6. Gusev V.P., Sidorina A.V. Insulation of noise of ventilation systems air ducts with coatings made of elastomeric and fibrous materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 6, pp. 37–39. (In Russian).
7. Gusev V.P., Leshko M.Yu., Sidorina A.V. Protection from air noise of elements of ventilation and air conditioning systems. *Proceedings of the conference-IV academic readings "Current issues of construction physics: energy saving, reliability, environmental safety", dedicated to the memory of G.L. Osipov* Moscow, July 3–5, 2012.
8. Gusev V.P., Leshko M.Yu., Sidorina A.V. Acoustic characteristics of coatings for ducts and process pipes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 6, pp. 35–38. (In Russian).
9. Gusev V.P., Sidorina A.V. Calculation and design of noise protection of transit air ducts of HVAC systems. *AVOK*. 2013. No. 2, pp. 94–100. (In Russian).
10. Application No. 2019129868 Frameless plates made of foamed elastic polymer based on nitrile rubber for ventilation silencers. Gusev V.P., Leshko M.Yu., Lukyanova A.V., Sidorina A.V., Shaikhutdinova N.Yu. 27.06.2019 (In Russian).

А.Д. ЖУКОВ¹, канд. техн. наук (lj211@yandex.ru); И.В. БЕССОНОВ², канд. техн. наук (bessonoviv@mail.ru), Л.К. БОГОМОЛОВА², канд. хим. наук, Н.А. ИВАНОВА², инженер, И.С. ГОВРЯКОВ², техник

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

Вспененные полимеры в системах изоляции конструкций, возводимых на проблемных грунтах

Изложены результаты исследований свойств изоляционных материалов, а также их применения в системах изоляции конструкций на свайных фундаментах, в том числе и в условиях вечномерзлых грунтов. Разработка систем изоляции основывалась на особенностях исполнения конструкций на свайных фундаментах, характеристиках изоляционных материалов, а также температурном режиме, влажности и атмосферных условиях эксплуатации изолируемых объектов. Обоснована необходимость разработки специальных решений для создания изоляционных оболочек, имеющих высокую теплотехническую однородность и долговечность, а также стойких к отрицательной и знакопеременной температуре. Проведено исследование тепло-, влаго- и парозащитных свойств таких систем. Установлено, что материалы изоляции должны иметь не только низкую теплопроводность, паро- и водонепроницаемость, но также и стойкость в агрессивных средах. В наибольшей степени для рассматриваемых конструкций являются пригодными вспененные пластмассы, а именно изделия на основе экструзионного пенополистирола, пенополиизоцианурата и пенополиэтилена. По результатам исследований предложены конструктивные и технические решения формирования бесшовной изоляционной оболочки свайных сооружений, возводимых на проблемных грунтах и в неблагоприятных климатических условиях, в том числе и в условиях Заполярья.

Ключевые слова: экструзионный пенополистирол, пенополиизоцианурат, вспененный полиэтилен, системы изоляции, теплотехническая однородность, долговечность, диффузионная влажопроводность.

Для цитирования: Жуков А.Д., Бессонов И.В., Богомоллова Л.К., Иванова Н.А., Говряков И.С. Вспененные полимеры в системах изоляции конструкций, возводимых на проблемных грунтах // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 54–58. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-54-58>

A.D. ZHUKOV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (lj211@yandex.ru); I.V. BESSONOV², Candidate of Sciences (Engineering) (bessonoviv@mail.ru), L.K. BOGOMOLOVA², Candidate of Sciences (Chemistry), N.A. IVANOVA², Engineer, I.S. GOVRYAKOV², Technician

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

² Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivny Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

Foamed Polymers in Insulation Systems for Structures Constructed on Problematic Soils

The article presents the results of studies of the properties of insulating materials, as well as their application in insulation systems of constructions on pile foundations, including in permafrost soils. The development of insulation systems was based on the features of constructions on pile foundations, the features of insulation materials, as well as temperature, humidity and atmospheric conditions of operation of insulated objects. The necessity of developing special solutions for the creation of insulating shells having high heat engineering uniformity and durability, as well as resistant to negative and alternating temperatures, is substantiated. An important factor is also the lack of air infiltration channels that occur during the docking of structural elements. Especially important is the consideration of this factor for buildings operating at stable negative temperatures and high wind loads. For construction in regions with unstable atmospheric characteristics, a comprehensive account of the heat, moisture, and vapor barrier properties of the insulation shell is required. It is established that insulation materials should have not only low thermal conductivity, vapor and water permeability, but also resistance in aggressive environments. Foamed plastics, namely products based on extruded polystyrene foam, polyisocyanurate foam and polyethylene foam, are most suitable for this contraction to the highest degree. Based on the research results, the article suggests constructive and technical solutions for the formation of a seamless insulating sheath of pile structures built on problematic soils and in adverse climatic conditions, including in the conditions of the Arctic.

Keywords: extruded polystyrene foam, polyisocyanurate foam, foamed polyethylene, insulation systems, heat engineering uniformity, durability, diffusion moisture conductivity.

For citation: Zhukov A.D., Bessonov I.V., Bogomolova L.K., Ivanova N.A., Govryakov I.S. Foamed polymers in insulation systems for structures built on problematic soils. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 54–58. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-54-58>

Системы изоляции зданий и сооружений являются главным компонентом формирования энергетически эффективных строительных конструкций. Основной целью возведения подобных конструкций является теплосбережение, создание комфортных условий внутри помещений и условий реализации технологических процессов (для которых необходима положительная температура), а также снижение отрицательных воздействий на окружающую среду, т. е. экологическая безопасность [1–3].

Условия реализации систем изоляции определяются как состоянием окружающей среды и климатическими особенностями места строительства, доступностью тех или иных изоляционных материалов и соответствием их характеристик предъявляемым требованиям, так и типом оснований и грунтов по месту ведения работ [4–6].

Одной из особенностей строительства на территории России, и это известно специалистам, являются сложные грунтовые условия. При возведении зданий

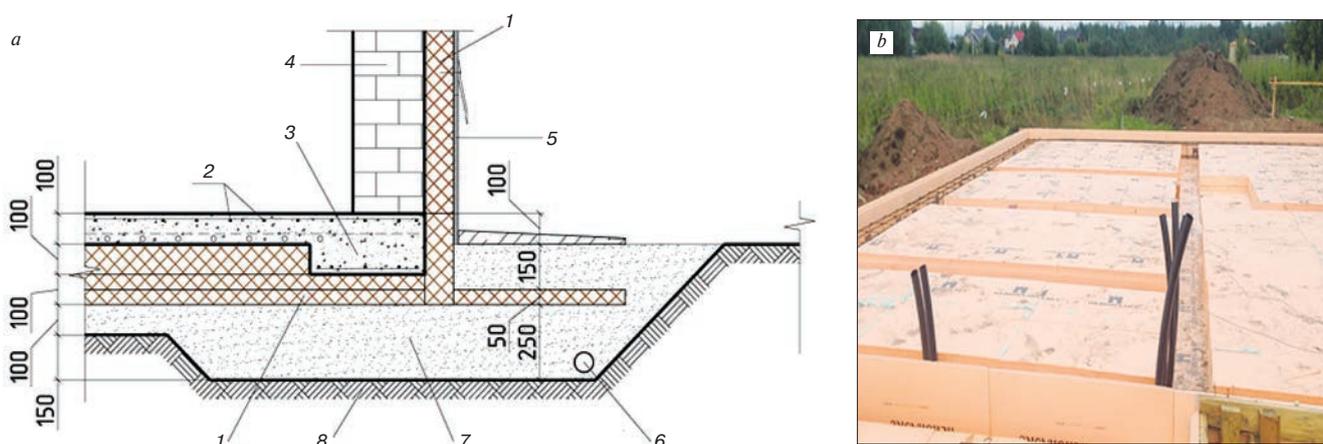


Рис. 1. Малозаглубленный плитный фундамент «шведская плита»: *a* – схема изоляции фундамента; *b* – общий вид; 1 – теплоизоляционные плиты на основе вспененных полимеров; 2 – арматура; 3 – железобетонная плита основания; 4 – стена; 5 – внешняя отделка; 6 – дренаж; 7 – песчано-гравийная подготовка; 8 – грунт основания

Fig. 1. A shallow slab foundation «Swedish plate»: *a* – a diagram of the insulation of the foundation, *b* – a general view; 1 – insulation boards based on foamed polymers; 2 – reinforcement; 3 – concrete base plate; 4 – wall; 5 – exterior finish; 6 – drainage; 7 – sand and gravel preparation; 8 – base soil

строителям приходится сталкиваться с решением вопросов, обусловленных наличием слабых или пучинистых грунтов, а также засоленных грунтов или же в районах Заполярья – наличием вечной мерзлоты и необходимостью ее сохранения.

Решение этой проблемы осуществляется несколькими способами: устройство фундаментов мелкого заложения, монолитных плавающих фундаментов и фундаментов типа «шведская плита», а также свайных фундаментов.

Актуальным является решение вопросов проектирования и строительства теплоизолированных фундаментов мелкого заложения на естественном основании, использующих теплоизоляцию из плит полистирольных вспененных экструзионных или плит на основе пенополиизоцианурата для предотвращения пучения фундаментов при сооружении их на сезоннопромерзающих грунтах или на непучинистых, но слабонесущих грунтах [7–9]. Размещение подошвы фундаментов на малой глубине (0,3–0,4 м) от поверхности грунта значительно сокращает трудоемкость и стоимость работ по возведению сооружений, в том числе малоэтажных зданий.

Малозаглубленный фундамент «Утепленная шведская плита» (УШП) представляет собой монолитный железобетонный теплоизолированный малозаглубленный фундамент, объединяющий в один конструктивный элемент собственно фундамент, пол первого этажа (либо пол по грунту), инженерные коммуникации и систему отопления первого этажа (рис. 1).

Поскольку фундамент УШП представляет собой плоскую систему, давление на грунт распределено равномерно, а дополнительные перекрестные ребра жесткости создают конструкцию, достаточно устойчивую к знакопеременным нагрузкам, возникающим при замораживании, оттаивании и просадке грунта. Благодаря этому фундамент типа «Утепленная шведская плита» может применяться на любом типе оснований: пучинистых, песчаных, супесчаных, суглини-

стых, глинистых, водонасыщенных и слабонесущих грунтах.

Морозоустойчивость УШП достигается за счет устройства теплоизоляции, которая состоит из теплоизоляционных плит на основе вспененных полимеров (как правило, XPS-плит или PIR-плит), расположенных в один слой вертикально по периметру фундамента и нескольких слоев, расположенных горизонтально, в основании. Применение экструзионного пенополистирола в конструкции УШП исключает промерзание почвы под фундаментом, и железобетонная плита с сетью инженерных коммуникаций находится в оптимальном тепловлажностном режиме, что позволяет использовать данную конструкцию в районах сурового климата и с распространением вечной мерзлоты.

Свайные фундаменты применяют в тех случаях, когда с поверхности залегают слои относительно слабых грунтов, не обладающих достаточной несущей способностью, чтобы служить основанием для фундаментов мелкого заложения (комбинированный фундамент), в качестве базовых оснований или для создания вентилируемого пространства под перекрытием.

Ростверк объединяет сваи (головы свай) и передает нагрузки от вышележащего здания на сваи и (иногда) частично на грунт. Выбор типа ростверка, свай и их размеров зависит от всего комплекса условий. Для устройства комбинированного фундамента используется низкий или повышенный ростверк; для

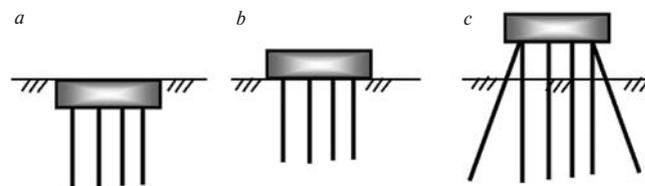


Рис. 2. Виды ростверков: *a* – низкий; *b* – повышенный; *c* – высокий

Fig. 2. Types of grillages: *a* – low; *b* – increased; *c* – high

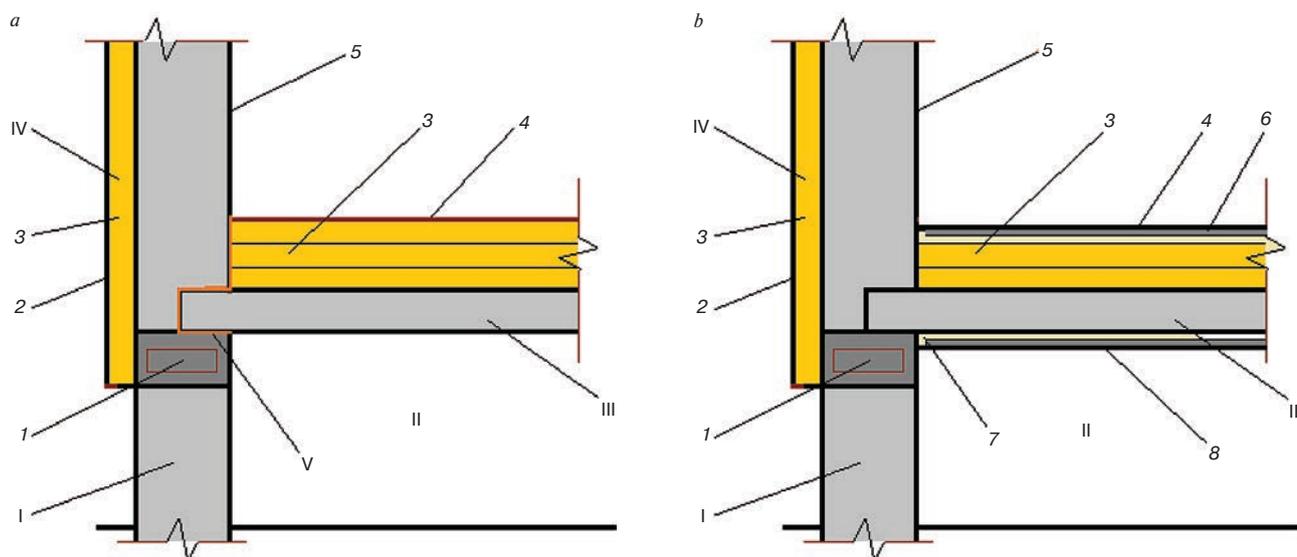


Рис. 3. Схема перекрытия жилого здания: *a* – система без утепления стыка; *b* – система с утеплением стыка; I – колонна; II – вентилируемое пространство под перекрытием первого этажа; III – перекрытие; IV – несущая стена; V – область повышенной теплопередачи и инфильтрации холодного воздуха; 1 – обвязка свай фундамента; 2 – система фасадная теплоизоляционная композиционная (СФТК); 3 – плитная теплоизоляция; 4 – финишное покрытие пола; 5 – интерьерная облицовка стен; 6 – система плавающего пола (сухой сборки); 7 – изоляция под перекрытием первого этажа; 8 – защитная облицовка

Fig. 3. The scheme of overlapping a residential building: *a* – a system without insulation of the joint; *b* – a system with insulation of the joint; I – a column; II – ventilated space under the ceiling of the first floor; III – overlap; IV – bearing wall; V – space of increased heat transfer and cold air infiltration; 1 – tying the foundation piles; 2 – system facade heat-insulating composite; 3 – plate insulation; 4 – finish flooring; 5 – interior wall cladding; 6 – floating floor system (dry assembly); 7 – insulation under the overlap of the first floor; 8 – protective lining

устройства свайного фундамента с вентилируемым пространством – повышенный ростверк (рис. 2).

Освоение северных территорий является актуальным для развития всех стран, граничащих с арктическими областями. Для России эти регионы приобретают особую важность ввиду целесообразности развития Северного морского пути, повышения обороноспособности страны, разведки и добычи нефти и газа на шельфе северных морей, а также добычи других полезных ископаемых.

Материалы для систем изоляции зданий и сооружений для северных широт должны иметь не только низкую теплопроводность, паро- и водонепроницаемость, но и стойкость в агрессивных средах и стойкость к воздействию грунтовых вод.

В наибольшей степени для рассматриваемых конструкций являются пригодными вспененные пластмассы, а именно изделия на основе экструзионного пенополистирола (XPS-плиты), пенополиизоцианурата (PIR-плиты) и пенополиэтилена (PE-изделия). Теплоизоляционные изделия на основе этих полимеров имеют низкую теплопроводность и паропроницаемость, высокую стойкость к воздействию влаги и всего комплекса морозных факторов. XPS- и PIR-плиты имеют большую жесткость и сопротивляемость к механическим нагрузкам и используются в конструкциях оснований дорог, фундаментов, контактирующих с грунтом и под нагрузкой, а также в фасадных системах с оштукатуриванием (СФТК). PE-изделия (маты или рулоны) являются эластичным материалом, позволяющим изолировать поверхности сложной конфигурации с использованием бесшовных сварных соединений [10–12].

Исследования эксплуатационных свойств теплоизоляции, и в частности ее устойчивость к воздействию отрицательной и знакопеременной температуры, систематически проводятся в НИИСФ РААСН, а так же в НИУ МГСУ. Эксперименты осуществлялись по нормативным методикам (ГОСТ 24816–2014; ГОСТ EN 12088–2011; ГОСТ EN 12087–2011; ГОСТ EN 1609–2011; ГОСТ EN 12091–2011), а также по методике, разработанной НИУ МГСУ на основе совместных исследований с Вильнюсским ТУ им. Гедиминаса (Литва), и экспресс-методики НИУ ВШЭ (ГАСИС) [7, 8]. Основой методики являлась оценка ползучести образцов теплоизоляционных изделий. Образцы подвергали климатическим воздействиям по различным режимам, после чего определяли их физико-механические характеристики (ГОСТ 17177–94), в том числе деформационные кривые, а далее исследовали их ползучесть под нагрузкой (ГОСТ EN 1606–2011).

Экспериментальные определения показали, что экструзионный пенополистирол и пенополиизоцианурат долговечен и обладает высокой прочностью при сжатии. Важно отметить, что именно высокая прочность при сжатии при 2% линейной деформации является основной характеристикой XPS (вместо стандартной прочности при 10% линейной деформации), поскольку именно при 2% деформации возможно определить наименьшую осадку.

Вспененный полиэтилен абсолютно инертен к воздействию отрицательной температуры до -60°C. Верхний порог его применения 80°C. Свойства этого материала (как прочностные и по отношению к действию влаги, так и теплозащитные) в результате кли-

матических и длительных механических воздействий практически не изменяются. Это позволяет его рекомендовать в системах изоляции, работающих в жестких климатических условиях.

Системы изоляции жилых объектов для Заполярья имеют ряд существенных особенностей, главной из которых являются технологии, позволяющие сохранять мерзлоту. Сохранение грунта в замерзшем состоянии предполагает либо использование плавающих фундаментов (по типу «шведской плиты») [2–3], что для жилых объектов не является эффективным (тепло уходит через пол, грунт размораживается и теряет несущую способность), либо строительство на сваях, применяемое повсеместно.

Схема изоляции жилого объекта со свайным фундаментом представлена на рис. 3, а. Изоляционная оболочка стен выполняется по технологии штукатурных фасадов с утеплением (СФТК), а перекрытие над вентилируемым пространством изолируется несколькими слоями XPS-плит, укладываемых со смещением швов.

Такая система изоляции имеет две негативные особенности, это мостики холода на стыках плит (смещение при укладке позволяет их минимизировать, но не полностью), а самое главное, серьезный канал теплопередачи между стыком теплоизоляционных плит и ограждающих конструкций (рис. 3, а). Это не только область активной кондуктивной теплопередачи, но и путь для инфильтрации холодного воздуха через неплотности стыка.

При значительной отрицательной температуре наружного воздуха (от -20°C и ниже) периметр здания в его нижней цокольной части остается в области отрицательной температуры, что является крайне нежелательным как с точки зрения формирования комфортного микроклимата в помещениях, так и с точки зрения долговечности конструкции, промерзающей на всю толщину. При этом толщина теплоизоляции, укладываемой по перекрытию, может достигать 500 мм.

Опыт применения вспененного полиэтилена в средней полосе России и, что немаловажно, реализации на десятках объектов основных принципов технологии ООО «ТЕПОФОР», основанных на механическом закреплении изоляционных листов (рулонов) многослойного пенополиэтилена и сварке стыков горячим воздухом, позволил сформулировать рекомендации по формированию эффективного изоляционного покрытия [4–6].

Рулонный пенополиэтилен с отражающим покрытием (фольгированный или металлизированный)

формирует и защитный слой по внешнему периметру конструкции и является основой плавающего пола, укладываемого по теплоизоляционным XPS- или PIR-плитам (рис. 3, б). При толщине XPS (PIR)-теплоизоляции 200 мм и суммарной толщине PE-изоляционного покрытия 60 мм термическое сопротивление изоляционного контура составляет не менее $8 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, при этом значительно повышается термическая однородность конструкции по глади поверхности и полностью исключаются пути инфильтрации холодного воздуха.

Отметим, что факторы теплосбережения и формирования комфортных условий в помещении (по влажности, температуре, разности температуры между стеной и помещением) выполняются в большей степени при реализации дополнительных инженерных решений. Установка рекуператоров позволяет экономить энергию и обеспечивать оптимальный температурно-влажностный режим в помещении. Теплый воздух из помещения проходит рекуператор и нагревает теплообменник, а при обратном ходе холодный, но чистый и сухой воздух с улицы проходит, подогревается в рекуператоре и поступает в помещение.

Применение вспененных пластмасс в системах тепловой изоляции конструкций, возводимых на проблемных грунтах, делает возможным создание энергоэффективных изоляционных оболочек. При проектировании и реализации таких систем необходимо учитывать как инженерно-геологические и климатические особенности места строительства, так и позитивные и негативные особенности вспененных полимеров, и в частности их эксплуатационную стойкость, обуславливающую долговечность конструкций. Поставленные задачи выполняются в процессе реализации научно-исследовательской работы по теме ФНИ РААСН «Материаловедческие основы формирования свойств строительных систем с применением вспененных искусственных конгломератов и методика оценки долговечности полимерных композиционных материалов в условиях умеренного климата России». Полученные результаты позволяют рекомендовать плитные изделия на основе экструзионного пенополистирола и пенополиизоцианурата для изоляции нагружаемых систем фундаментов мелкого заложения, а также эти изделия в комплексе с рулонным вспененным полиэтиленом для систем изоляции конструкций над вентилируемым пространством свайных фундаментов с высоким ростверком.

Список литературы

1. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Математическая модель и методика расчета влажностного состояния конструкций // *Academia. Архитектура и строительство*. 2006. № 2. С. 60–63.

References

1. Gagarin V.G., Kozlov V.V. The mathematical model and methodology for calculating the moisture state of structures. *Academia. Arkhitektura i Stroitel'stvo*. 2006. No. 2, pp. 60–63. (In Russian).

2. Тер-Закарян А.К., Жуков А.Д. Изоляционная оболочка малоэтажных зданий // *Жилищное строительство*. 2019. № 8. С. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-8-15-18>
3. Теличенко В.И., Орешкин Д.В. Материаловедческие аспекты геоэкологической и экологической безопасности в строительстве // *Экология урбанизированных территорий*. 2015. № 2. С. 31–33.
4. Жук П.М., Жуков А.Д. Нормативно-правовая база экологической экспертизы строительных материалов: перспективы совершенствования // *Экология и промышленность России*. 2018. № 4. С. 52–57. DOI: [10.18412/1816-0395-2018-4-52-57](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-4-52-57)
5. Умнякова Н.П. Взаимосвязь экологического состояния городов и долговечности строительных материалов и конструкций // *Жилищное строительство*. 2012. № 1. С. 30–33.
6. Жуков А.Д., Тер-Закарян К.А., Бессонов И.В., Семенов В.С., Старостин А.В. Системы изоляции каркасных коттеджей // *Academia. Архитектура и строительство*. 2019. № 1. С. 122–127. DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2019-1-122-127>
7. Зиновьева Е.А., Жуков А.Д., Тер-Закарян А.К., Бессонов И.В. Купольный дом вегетарий // *Жилищное строительство*. 2019. № 7. С. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-7-35-40>
8. Жуков А.Д., Тер-Закарян К.А., Бессонов И.В., Семенов В.С., Старостин А.В. Системы строительной изоляции с применением пенополиэтилена // *Строительные материалы*. 2018. № 9. С. 58–61. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-763-9-58-61>
9. Патент РФ № 2645190 «Замковая технология теплоизоляционного материала для бесшовной сварки соединительных замков» зарегистрирован 16 февраля 2018 г.
10. Семенов В.С., Тер-Закарян К.А., Жуков А.Д., Сазонова Ю.В. Особенности реализации изоляционных систем в условиях Крайнего Севера // *Строительные материалы*. 2018. № 4. С. 65–69. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-65-69>
11. Жуков А.Д., Тер-Закарян К.А., Бессонов И.В., Лобанов В.А., Старостин А.В. Энергетическая эффективность бесшовных изоляционных оболочек // *Строительные материалы*. 2019. № 6. С. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-49-55>
12. Zhukov A., Semyonov V., Gnip I., Vaitkus S. The investigation of expanded polystyrene creep behavior // *MATEC Web of Conferences. R-S-P Seminar Theoretical Foundation of Civil Engineering*. 2017. 117:00184. DOI: [10.1051/matecconf/201711700184](https://doi.org/10.1051/matecconf/201711700184)
2. Ter-Zakaryan A.K., Zhukov A.D. Insulation shell of low-rise buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 8, pp. 35–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-8-15-18>
3. Telichenko V.I., Oreshkin D.V. Material science aspects of geoeological and environmental safety in construction. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*. 2015. No. 2, pp. 31–33. (In Russian).
4. Zhuk P.M., Zhukov A.D. The regulatory framework for the environmental impact assessment of building materials: prospects for improvement. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2018. No. 4, pp. 52–57. (In Russian). DOI: [10.18412/1816-0395-2018-4-52-57](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-4-52-57)
5. Umnyakova N.P. The relationship of the ecological state of cities and the durability of building materials and structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2012. No. 1, pp. 30–33.
6. Zhukov A.D., Ter-Zakaryan K.A., Bessonov I.V., Semenov V.S., Starostin A.V. Insulation systems for frame cottages. *Academia. Arkhitektura i Stroitel'stvo*. 2019. No. 1, pp. 122–127. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2019-1-122-127>
7. Zinov'eva E.A., Ter-Zakaryan A.K., Zhukov A.D., Bessonov I.V. Dome house vegetarian. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 7, pp. 35–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-7-35-40>
8. Zhukov A.D., Ter-Zakaryan K.A., Bessonov I.V., Semenov V.S., Starostin A.V. Systems of construction insulation with the use of foam polyethylene. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No.9, pp.58–61. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-763-9-58-61> (In Russian).
9. Patent RF No. 2645190 “Lock technology of heat-insulating material for seamless welding of joint locks” was registered on February 16, 2018. (In Russian).
10. Semenov V.S., Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Sazonova Yu.V. Features of realization of insulation systems under conditions of the Far North. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 4, pp. 65–69. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-758-4-65-69> (In Russian).
11. Zhukov A.D., Ter-Zakaryan K.A., Bessonov I.V., Lobanov V.A., Starostin A.V. Energy efficiency of seamless insulating shells. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 6, pp. 49–55. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-49-55>
12. Zhukov A., Semyonov V., Gnip I., Vaitkus S. The investigation of expanded polystyrene creep behavior. *MATEC Web of Conferences. R-S-P Seminar Theoretical Foundation of Civil Engineering*. 2017. 117:00184. DOI: [10.1051/matecconf/201711700184](https://doi.org/10.1051/matecconf/201711700184)

УДК 675.017.623

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-59-64>К.П. ЗУБАРЕВ^{1,2}, канд. техн. наук (zubarevkill93@mail.ru)¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

Экспериментальное определение коэффициента паропроницаемости образца строительного материала при вертикальном положении

Расчеты влажностного режима требуют экспериментальных данных о коэффициентах диффузии влаги. Математические модели влажностного режима часто используют коэффициент паропроницаемости как основной фактор, влияющий на распределение влаги внутри ограждающей конструкции. Однако для экспериментального определения коэффициентов паропроницаемости строительных материалов используется метод мокрой чаши. По этому методу образец строительного материала располагается в горизонтальном положении, однако в строительной практике применяются ограждающие конструкции, которые находятся в вертикальном положении. В настоящей работе было проведено сравнение коэффициентов паропроницаемости тепловой изоляции из минеральной ваты для горизонтального и вертикального положений. Для этого было разработано экспериментальное устройство, которое имеет L-образный корпус и датчики относительной влажности воздуха, расположенные по высоте устройства. Предложенное устройство позволяет определять значения коэффициентов паропроницаемости для разных строительных материалов в вертикальном положении. Было проведено восемь экспериментов на предложенном устройстве и столько же по методу мокрой чаши для определения различий коэффициентов паропроницаемости, далее были использованы статистические методы для работы с экспериментальными данными. Для обработки полученных в экспериментах значений использованы тест Шапиро–Уилка и критерий Стьюдента. В результате отличий между коэффициентами паропроницаемости горизонтально и вертикально расположенных образцов минеральной ваты обнаружено не было. Минеральная вата была выбрана для исследования, потому что она имеет один из наибольших коэффициентов паропроницаемости среди всех строительных материалов. Было доказано, что коэффициент паропроницаемости минеральной ваты и других строительных материалов с меньшими коэффициентами паропроницаемости, чем у минеральной ваты, можно определять по методу мокрой чаши и назначать вертикально ориентированным ограждающим конструкциям без применения дополнительных уточняющих коэффициентов.

Ключевые слова: влажностный режим, экспериментальное устройство, паропроницаемость, сопротивление паропроницанию, минеральная вата.

Для цитирования: Зубарев К.П. Экспериментальное определение коэффициента паропроницаемости образца строительного материала при вертикальном положении // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 59–64.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-59-64>K.P. ZUBAREV^{1,2}, Candidate of Science (Engineering) (zubarevkill93@mail.ru)¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)² Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

Experimental Determination of the Vapor Permeability Coefficient of a Sample of Building Material in Vertical Position

Calculations of the moisture transfer require an experimental data of the moisture diffusion coefficients. Moisture transfer mathematical models often use a permeability coefficient as the main factor, which influences the moisture behaviour inside enclosing structures. However, the wet cup method is used for experimental determining permeability coefficients of construction materials. In this method sample of a building material is located in horizontal position, but in a construction industry, there are a lot of enclosing structures which have vertical position. In a current article, a comparison of permeability coefficients of mineral wool insulation for vertical and horizontal positions of samples was made. For that, a new experimental device which has L-type of installation housing and relative humidity sensors installing along the device heights was built. This device allows to obtain the exact value of permeability coefficients for different construction materials in vertical position. Eight experiments with the new device and the same number of experiments by wet cup method were carried out to make a comparison, then statistics methods were used to work with experimental data. The Shapiro Wilk test and Student criterion were used to process the experimental data. As a result, it was discovered that the permeability coefficients of mineral wool in horizontal and vertical positions do not have any differences. The mineral wool insulation was chosen, because it has one of the biggest permeability coefficient from all the construction materials. It proved that the permeability coefficients of mineral wool insulation and other construction materials with less permeability coefficients than mineral wool can be obtained by wet cup method and can be used for vertical enclosing structures without additional refinement coefficients.

Keywords: moisture regime, experimental device, vapor permeability, vapor permeability resistance, mineral wool.

For citation: Zubarev K.P. Experimental determination of the vapor permeability coefficient of a sample of building material in vertical position. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 59–64. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-59-64>

Развитие влажностного режима

Развитие строительства требует оценки влажностного режима ограждающих конструкций зданий [1–5]. Данный вопрос исследуется в различных направлениях: создаются и разрабатываются математические модели влагопереноса в капиллярно-пористых телах [6–8], производится оценка влияния влажностного режима на тепловую защиту зданий [9–13], исследуются коэффициенты диффузии влаги [14, 15].

Методы определения коэффициента паропроницаемости строительного материала. Одним из наиболее важных коэффициентов диффузии влаги является коэффициент паропроницаемости. Существуют различные методы оценки коэффициента паропроницаемости [16].

В России применяют метод мокрой чаши, который основан на том, что образец строительного материала помещается горизонтально над чашей с водой. Пространство между образцом и чашей изолируется герметиком. Таким образом, поток водяного пара движется перпендикулярно поверхности образца.

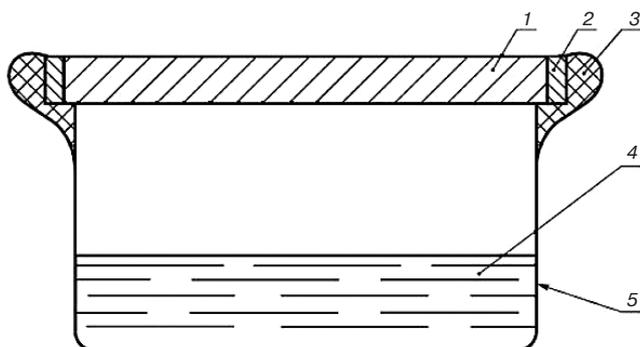


Рис. 1. Схема устройства по методу мокрой чаши по ГОСТ 25898–2012: 1 – образец; 2 – удерживающий шаблон; 3 – герметик; 4 – вода; 5 – испытательный сосуд

Fig. 1. The scheme of the device according to the wet cup method according to GOST 25898–2012: 1 – sample; 2 – holding pattern; 3 – sealant; 4 – water; 5 – test vessel



Рис. 2. Устройство с установленным на нем образцом минеральной ваты

Fig. 2. Devices with a sample of mineral wool installed on it

Далее путем последовательных взвешиваний определяется изменение массы образца с чашей и рассчитывается коэффициент паропроницаемости строительного материала [16].

Подробно данная методика описана в ГОСТ 25898–2012 «Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию».

Схема устройства по определению коэффициента паропроницаемости по методу мокрой чаши представлена на рис. 1.

На рис. 2 показано устройство с установленным на нем образцом минеральной ваты.

Метод мокрой чаши позволяет определить коэффициент паропроницаемости строительного материала в горизонтальном положении при естественной конвекции воздуха над поверхностью образца [16].

Существуют и другие методы исследования коэффициента паропроницаемости строительного материала. Одна из последних разработок принадлежит В.Н. Куприянову и А.С. Петрову, которые создали устройство, позволяющее определить коэффициент паропроницаемости в условиях вынужденной конвекции воздуха над образцом [17].

Устройство представляет собой чашу, которая погружена в специальную жидкость с нагревателем. Образец устанавливается в горизонтальной плоскости над чашей, а пространство между чашей и образцом изолируется герметиком. Вентилятор создает поток воздуха над образцом и таким образом моделирует эксплуатационное воздействие ветра на образец. Устройство, разработанное В.Н. Куприяновым и А.С. Петровым для экспериментального исследования характеристик паропроницаемости, показано на рис. 3 [17].

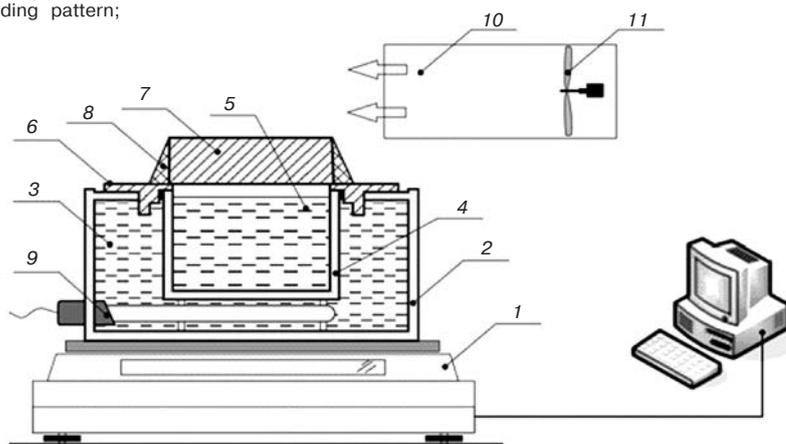


Рис. 3. Устройство для экспериментального исследования характеристик паропроницаемости в специально моделируемых (лабораторных) условиях: 1 – электронные весы, соединенные с компьютером; 2 – жидкостной термостат; 3 – специальная жидкость; 4 – чаша; 5 – вода; 6 – обойма; 7 – испытуемый образец; 8 – герметик; 9 – регулятор температуры; 10 – аэродинамическая труба; 11 – вентилятор [17]

Fig. 3. The device for the experimental study of the vapor permeability characteristics in specially simulated (laboratory) conditions: 1 – electronic balance connected to a computer; 2 – liquid thermostat; 3 – special liquid; 4 – cup; 5 – water; 6 – clip; 7 – test sample; 8 – sealant; 9 – temperature regulator; 10 – aerodynamic tube; 11 – ventilator [17]

Важным результатом экспериментов В.Н. Куприянова и А.С. Петрова было определение того факта, что коэффициенты паропроницаемости теплоизоляционных материалов из минеральной ваты наиболее чувствительны к изменениям параметров микроклимата вокруг испытуемого образца в сравнении с другими строительными материалами [17].

Этот факт дает возможность проводить эксперименты на тепловой изоляции из минеральной ваты для определения отличий коэффициента паропроницаемости по методу мокрой чаши и при других условиях испытания. Если различия не будут найдены, то можно говорить о применении результатов исследования ко всему спектру строительных материалов.

Задача исследования

Практически во всех устройствах коэффициент паропроницаемости располагается горизонтально. Таким образом, коэффициенты паропроницаемости определяются на образцах, расположенных горизонтально, а назначаются вертикально расположенным ограждающим конструкциям.

Задача исследования проверить, отличаются ли коэффициенты паропроницаемости горизонтально и вертикально расположенных образцов строительного материала. В учет вышеописанных результатов других ученых было принято решение в качестве испытуемого строительного материала взять минеральную вату из каменного волокна.

Материалы и методы

Разработанное устройство для определения коэффициента паропроницаемости. Сконструировано экспериментальное устройство, представляющее собой емкость, выполненную в сечении L-образной формы. В верхней части длинной стороны устройства образовано окно для установки в нем вертикально расположенного испытуемого образца строительного материала (размер окна составляет $(0,1 \times 0,1 \times 0,03)$ м). По высоте установки рассредоточены датчики относительной влажности воздуха. Датчики относительной влажности воздуха дают возможность определять среднюю относительную влажность воздуха по всей высоте образца. Таким образом, вертикальное расположение образца соответствует фактическому расположению строительного материала в стене здания, что позволяет в процессе испытания моделировать близкие к условиям эксплуатации воздействия воздушного потока на здание. Это обеспечивает возможность проведения измерений паропроницаемости строительных материалов с вертикальным расположением образца [18].

Представлены схема устройства (рис. 4, а) для измерения коэффициента паропроницаемости с горизонтальным расположением испытуемого образца и его фотография (рис. 4, б).

Устройство устанавливается на электронные весы, подключенные к компьютеру. Также связь с

компьютером имеют датчики относительной влажности воздуха внутри экспериментальной установки и один датчик относительной влажности воздуха снаружи установки.

Компьютер автоматически фиксирует изменение массы установки с образцом, получаемое с весов, а также регистрирует показания относительной влажности воздуха, получаемые с датчиков (рис. 5).

Метод расчета коэффициента паропроницаемости на предложенном устройстве. Коэффициент паропроницаемости строительного материала может быть вычислен по формуле:

$$\mu = \frac{\delta}{R_{\text{устр}}^{\text{устр}}}, \quad (1)$$

где δ – средняя толщина испытуемого образца строительного материала, м; $R_{\text{устр}}^{\text{устр}}$ – сопротивление паропроницанию испытуемого образца, установленного на предложенное устройство, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$.

Сопротивление паропроницанию испытуемого образца может быть определено как отношение градиента парциального давления внутри и снаружи устройства к потоку влаги через образец в стационарных условиях минус отношение толщины слоя воздуха между датчиками относительной влажности воздуха и образцом к коэффициенту паропроницаемости воздуха внутри устройства:

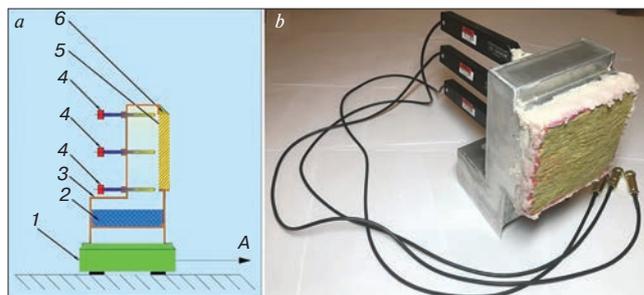


Рис. 4. Устройство для определения коэффициента паропроницаемости вертикально расположенного образца: а – схема устройства (1 – электронные весы; 2 – вода; 3 – корпус устройства; 4 – датчики относительной влажности воздуха; 5 – испытуемый образец; 6 – герметик; А – связь электронных весов с компьютером); б – фотография устройства (на устройстве установлен образец из минеральной ваты из каменного волокна) [18].

Fig. 4. Scheme of vapour permeability coefficient measuring device in case of horizontal test sample position (1 – electronic scales; 2 – water; 3 – device case; 4 – relative air humidity sensors; 5 – test sample; 6 – sealing compound; A – link between electronic scales and computer); b – device for vapor permeability coefficient measurement in case of horizontal test sample position (rock wool sample is in the device) [18]



Рис. 5. Общий вид устройства для определения коэффициента паропроницаемости вертикально расположенного образца

Fig. 5. General view of the device connected to computers

$$R_{\Pi}^{\text{устр}} = \frac{e_{\text{в.устр}} - e_{\text{н.устр}}}{g} - \frac{d_{\text{возд}}}{\mu_{\text{возд}}}, \quad (2)$$

где $e_{\text{в.устр}}$ — парциальное давление водяного пара внутри устройства, осредненное по высоте образца, Па; $e_{\text{н.устр}}$ — парциальное давление водяного пара снаружи устройства, Па; $d_{\text{возд}}$ — толщина слоя воздуха между датчиками относительной влажности воздуха и испытуемым образцом, м; $\mu_{\text{возд}}$ — коэффициент паропроницаемости воздуха внутри устройства, кг/(м·с·Па).

Внутри устройства расстояние между датчиками относительной влажности воздуха и испытуемым материалом мало, поэтому можно пренебречь влиянием воздушной прослойки. В этом случае формула (2) примет вид:

$$R_{\Pi}^{\text{устр}} = \frac{e_{\text{в.устр}} - e_{\text{н.устр}}}{g}. \quad (3)$$

Парциальное давление водяного пара снаружи устройства:

$$e_{\text{н.устр}} = E_t \cdot \Phi_{\text{с.устр}}, \quad (4)$$

где $\Phi_{\text{с.устр}}$ — относительная влажность воздуха снаружи устройства.

Парциальное давление водяного пара внутри устройства:

$$e_{\text{в.устр}} = E_t \cdot \Phi_{\text{в.устр}}, \quad (5)$$

где $\Phi_{\text{в.устр}}$ — относительная влажность воздуха внутри устройства, осредненная по высоте образца, Па.

Относительная влажность воздуха внутри устройства определяется с помощью датчиков относительной влажности воздуха, рассредоточенных по высоте образца:

$$\Phi_{\text{в.устр}} = \frac{1}{h_{\text{исп.обр}}} \cdot \int_0^h f(x) dx, \quad (6)$$

где $h_{\text{исп.обр}}$ — высота испытуемого образца в разработанном устройстве, м (0,1 м); $f(x)$ — функция зависимости показаний датчиков от высоты, м.

С учетом уравнений (1), (3) – (6) коэффициент паропроницаемости на предложенном устройстве может быть определен по формуле:

$$\mu = \frac{\delta \cdot g}{E_t \cdot \left(\frac{1}{h} \cdot \int_0^h f(x) dx - \Phi_{\text{н.устр}} \right)}. \quad (7)$$

Результаты и обсуждения

Сравнение коэффициентов паропроницаемости на предложенном устройстве и по методу мокрой чаши. Было проведено восемь экспериментов по методу мокрой чаши и восемь экспериментов на предложенном устройстве.

Эксперименты по определению коэффициента паропроницаемости на предложенном устройстве и по методу мокрой чаши

Experiments to determine the coefficient of vapor permeability of the proposed device and the wet cup method

№ опыта	Коэффициент паропроницаемости, определенный на предложенном устройстве, мг/(м·ч·Па)	Коэффициент паропроницаемости, определенный по методу мокрой чаши, мг/(м·ч·Па)
1	0,31	0,306
2	0,311	0,306
3	0,308	0,307
4	0,309	0,309
5	0,314	0,31
6	0,313	0,311
7	0,311	0,307
8	0,312	0,308
Среднее	0,311	0,308

Результаты экспериментального определения коэффициентов паропроницаемости представлены в таблице.

Статистическая обработка экспериментальных данных

Для выявления статистически значимых отличий экспериментальные данные были проверены на возможное отклонение от нормального распределения по критерию Шапиро–Уилка. В результате было получено, что экспериментальные данные соответствуют нормальному распределению для экспериментов на двух устройствах (см. таблицу). Таким образом, возможно применить критерий Стьюдента для сравнения двух независимых выборок.

Выборочное среднее для каждой выборки определялось по формуле:

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n_{\text{выб}}}, \quad (8)$$

где \bar{X} — выборочное среднее; X — значение признака; $n_{\text{выб}}$ — объем выборки.

Выборочное стандартное отклонение определялось по формуле:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n_{\text{выб}} - 1}}, \quad (9)$$

где s — выборочное стандартное отклонение.

Стандартная ошибка среднего определялась по формуле:

$$s_{\bar{X}} = \frac{s}{\sqrt{n_{\text{выб}}}}, \quad (10)$$

где $s_{\bar{X}}$ — стандартная ошибка среднего.

Критерий Стьюдента определяется по формуле:

$$t_{Cm} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{s_{\bar{X}_1}^2 + s_{\bar{X}_2}^2}}, \quad (11)$$

где t_{Cm} – критерий Стьюдента; \bar{X}_1 – выборочное среднее для первой выборки; \bar{X}_2 – выборочное среднее для второй выборки; $s_{\bar{X}_1}^2$ – стандартная ошибка среднего для первой выборки; $s_{\bar{X}_2}^2$ – стандартная ошибка среднего для второй выборки.

В результате статистическая обработка данных показала отсутствие статистически значимых отличий между коэффициентами паропроницаемости минеральной ваты из каменного волокна, определенными на предложенном устройстве и по методу мокрой чаши.

Результат проведенного экспериментального исследования подтверждает возможность использования коэффициента паропроницаемости, определенного по методу мокрой чаши, для вертикально ориентированных ограждающих конструкций.

Заключение

Таким образом, экспериментально определено, что коэффициент паропроницаемости минеральной ваты и других строительных материалов с меньшими коэффициентами паропроницаемости, чем у минеральной ваты, можно определять по методу мокрой чаши и назначать вертикально ориентированным ограждающим конструкциям без применения дополнительных уточняющих коэффициентов.

Список литературы / References

1. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // *Строительство: наука и образование*. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3
1. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. 2018. Vol. 8. No. 3, pp. 35–53. (In Russian). DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3
2. Мусорина Т.А., Заборова Д.Д., Петриченко М.Р. Математический аппарат для определения термического сопротивления однородной скалярной среды // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 8. С. 1037–1045. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1037-1045
2. Musorina T.A., Zaborova D.D., Petrichenko M.R. Mathematical apparatus for determination of homogenous scalar medium thermal resistance. *Vestnik MGSU*. 2019. Vol. 14. No. 8, pp. 1037–1045. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1037-1045
3. Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Методика определения суммарного сопротивления паропроницанию наружных отделочных слоев фасадных теплоизоляционных композиционных систем с наружными штукатурными слоями // *Вестник МГСУ*. 2012. № 11. С. 140–143.
3. Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Methodology of identification of the overall water vapour permeability resistance of external finishing layers of composite thermal insulation facade systems that have external plaster layers. *Vestnik MGSU*. 2012. No. 11, pp. 140–143. (In Russian)
4. Гагарин В.Г., Зубарев К.П. Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 4 (127). С. 484–495. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495
4. Gagarin V.G., Zubarev K.P. Moisture potential theory application for modelling of enclosing structure unsteady-state moisture regime. *Vestnik MGSU*. 2019. Vol. 14. No. 4 (127), pp. 484–495. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495
5. Гагарин В.Г., Зубарев К.П. Математическое моделирование нестационарного влажностного режима ограждений с применением дискретно-континуального подхода // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 2. С. 244–256. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.244-256
5. Gagarin V.G., Zubarev K.P. Mathematical modeling of the unsteady moisture condition of enclosures with application of the discrete-continuous approach. *Vestnik MGSU*. 2020. Vol. 15, No. 2 (127), pp. 244–256. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.244-256
6. Гагарин В.Г., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Position control of maximum wetting plane for building walls with foam polystyrene heat insulator. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2020. No. 022045. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022045
7. Гагарин В.Г., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Graphical method for determination of maximum wetting plane position in enclosing structures of buildings. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2020. No. 022046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022046
8. Гореховский А.Г., Шишкина Е.Е., Старова Е.В., Миков А.А. Анализ процессов сушки древесины существенно неизотермическими режимами // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2018. Т. 262. № 2. С. 88–96. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.88
8. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Starova E.V., Mikov A.A. Wood Drying Processes under Essentially Nonisothermal Conditions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*. 2018. Vol. 262, No. 2, pp. 88–96. (In Russian) DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.88
9. Wu Z., Wong H.S., Buenfeld N.R. Transport properties of concrete after drying-wetting regimes to elucidate the effects of moisture content, hysteresis and microcracking. *Cement and concrete research*. 2017. No. 98, pp. 136–154. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.006>
10. Liu Z.C., Hansen W., Wang F.Z. Pumping effect to accelerate liquid uptake in concrete and its implications on salt frost durability. *Construction and building materials*. 2018. No. 158, pp. 181–188. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.154

11. Hoseini A., Bahrami A. Effects of humidity on thermal performance of aerogel insulation blankets. *Journal of building engineering*. 2017. No. 13, pp. 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.07.001>
12. Jin H.Q., Yao X.L., Fan L.W., Xu X., Yu Z.T. Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content. *International journal of heat and mass transfer*. 2016. No. 92, pp. 589–602.
13. Skerget L., Tadeu A., Ravnik J. BEM numerical simulation of coupled heat, air and moisture flow through a multilayered porous solid. *Engineering analysis with boundary elements*. 2017. No. 74, pp. 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2016.10.004>
14. Nizovtsev M.I., Letushko V.N., Yu. Borodulin V., Sterlyagov A.N. Experimental studies of the thermo and humidity state of a new building facade insulation system based on panels with ventilated channels. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 206. No. 109607.
15. Петров А.С., Юзмухаметов А.М., Куприянов В.Н., Андрейцева К.С. Определение характера увлажнения ограждающих конструкций экспериментальным методом цветовой индикации // *Строительные материалы*. 2019. № 6. С. 24–28. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-24-28
16. Petrov A.S., Kupriyanov V.N. About operational factor influence on vapor permeability of heat-insulating materials. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8, No. 1, pp. 11248–11256.
17. Куприянов В.Н., Петров А.С. Паропроницаемость материалов в условиях, приближенных к эксплуатационным // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2013. № 2 (24). С. 126–131.
18. Zubarev K.P., Gagarin V.G. Graphical method for determination of maximum wetting plane position in enclosing structures of buildings. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2018. No. 032082. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032082

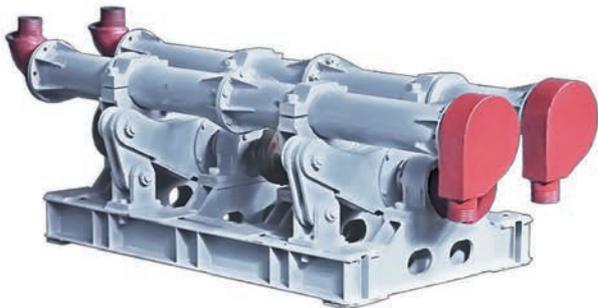


Активатор
измельчение активация синтез

Российские промышленные и лабораторные шаровые мельницы интенсивного помола.

Реклама

Центробежные эллиптические мельницы



Высокая производительность при низком энергопотреблении

- *смешение компонентов
- *активация цемента
- *получение сухих смесей
- *подготовка шихты
- *помол наполнителей
- *помол пигментов

Лабораторные планетарные мельницы



Мельницы для пробоподготовки
Высокоинтенсивная обработка

Мельницы, другое оборудование и результаты помола материалов на www.activator.ru

Новосибирск,
Софийская 14, оф 17
630056, Новосибирск 56, а/я 141
Тел: +7 (3845) 71 0 61
+7 960 780 77 06
e-mail: zhm.activator@gmail.com

В.Е. АБРАМОВ, д-р техн. наук

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

Закономерности накопления радона в помещениях зданий и сооружений

Человек большую часть годовой дозы облучения получает от радона и его дочерних продуктов распада вследствие длительного пребывания в помещениях. Поэтому основной задачей по обеспечению радиационной безопасности населения является поиск путей снижения этой величины. У инженеров в России и за рубежом возникают вопросы о том, почему в отдельных помещениях зданий и сооружений активность радона-222 стабильна, а в других, напротив, нарастает или убывает. Ясно, что эти явления отражают действие каких-то неизвестных закономерностей. Но каких? В данной работе автор на конкретных примерах показывает результаты исследований этих закономерностей. Установлено, что для замещения распавшихся атомов радона достаточно с избытком того ничтожного количества радона-222, который поступает с внутренних поверхностей помещений зданий и сооружений. Статья является продолжением ранее начатого исследования.

Ключевые слова: радон-222, замещение распавшихся атомов радона-222, накопление радона, внутренние поверхности помещений.

Для цитирования: Абрамов В.Е. Закономерности накопления радона в помещениях зданий и сооружений // *Строительные материалы*. 2020. № 6. С. 65–68. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-65-68>

V.E. ABRAMOV, Doctor of Sciences (Engineering)

Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21, Lokomotivniy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

Regularities of Radon Accumulation in Premises of Buildings and Structures

A person receives most of the annual radiation dose from radon and its daughter products of decay due to prolonged stay in the premises. Therefore, the main task of ensuring radiation safety of the population is to find ways to reduce this value. Engineers in Russia and abroad have questions about why the activity of radon-222 is stable in certain areas of buildings and structures, while in others, on the contrary, it increases or decreases. It is clear that these phenomena reflect the action of some unknown laws. But which ones? In this paper, the author uses concrete examples to show the results of research on these regularities. It is established that to replace the decayed radon atoms, that insignificant amount of radon-222, which comes from the internal surfaces of buildings and structures, is enough with excess. The article is a continuation of the previously started research.

Keywords: radon-222, replacement of decayed radon-222 atoms, accumulation of radon, internal surfaces of premises.

For citation: Abramov V.E. Regularities of radon accumulation in premises of buildings and structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 6, pp. 65–68. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-65-68>

Общие сведения о радоне и закономерностях радиоактивного распада

В современной физике под химическим элементом из таблицы Менделеева понимают смесь изотопов этого элемента. Радон не является исключением. В природе он представлен смесью трех изотопов, отличающихся друг от друга атомной массой и периодом полураспада:

- 1) Rn (радон ${}_{86}\text{Rn}^{222}$), другая форма записи *радон-222*;
- 2) Tn (торон ${}_{86}\text{Rn}^{220}$), или иначе *радон-220*;
- 3) An (актион ${}_{86}\text{Rn}^{219}$), иначе *радон-219*.

В таблице приведены основные параметры радиоактивности изотопов радона [1].

Из данных таблицы видно, что наиболее долгоживущим изотопом является радон-222. Он вносит основной вклад в уровень радиоактивного заражения

Параметры радиоактивности
Radioactivity parameters

Параметр радиоактивности	Радон Rn	Торон Tn	Актион An
Период полураспада, с	303307	55,6	3,96
Постоянная распада, 1/с	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	0,177

ния. Вклад остальных изотопов не превышает 15% от общего уровня заражения.

Все изотопы радона радиоактивны, радиотоксичны и канцерогенны. Все они являются α -излучателями – распадаются с испусканием α -частицы (ядра гелия).

Изотопы радона сохраняют газообразное состояние от температуры -65°C и выше. Молекулы изотопов радона одноатомные. Изотопы радона относятся к числу благородных газов, так как они химически инертны [2].

В данной работе рассматривается только радон-222 и только в газообразном состоянии, т. е. при температуре выше -65°C и нормальном атмосферном давлении.

Методы измерения интенсивности радиоактивного распада ядер радона и вычисления их количества

Чрезвычайная разреженность изотопов радона и продуктов их распада не позволяет вне лаборатории реально измерять количество их молекул в единице объема воздуха. Фактически измеримы только акты радиоактивного распада атомов, как изотопов радона, так и продуктов их распада. Количество актов распада в единицу времени называют активностью. Обозначение активности A. Единица измерения ак-

тивности Беккерель (Бк). Один Беккерель равен одному распаду одного ядра атома в единице объема в единицу времени. В представленной работе за единицу объема принят один кубический метр, а за единицу времени — одна секунда. Тогда размерность активности составляет Бк/(м³·с). Активность вместе с постоянной распада радиоактивного вещества практически полностью заменяет обычные характеристики газов.

Зная величину активности, можно вычислить количество атомов радона для случая, когда количество поступающих за одну секунду «свежих» атомов радона постоянно во времени и равно объемной активности (количеству распадов атомов радона за 1 с в 1 м³ объема) имеем:

$$A = \lambda \cdot N; \quad (1)$$

$$N = \frac{A}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ — постоянная величина, имеющая для радона-222 численное значение $2,0974 \cdot 10^{-6}$ и смысл вероятности, но отличающаяся от нее наличием размерности с⁻¹; A — объемная активность, Бк/(м³·с); N — количество (концентрация) атомов радона в 1 м³ объема штук.

Постоянная распада λ относится к числу фундаментальных параметров радиоактивного распада. Ее численное значение не зависит от внешних факторов, например таких, как температура и давление. Из вышеизложенного следует, что формулы (1) и (2) являются весьма устойчивыми соотношениями между количеством атомов радона и количеством их распадов в 1 м³ объема.

Основной закон радиоактивного распада

Этот закон универсален. Он действителен для α , β и γ распадов для всех радиоактивных материалов. В данном случае интересен не столько сам закон, сколько допущения, принятые для его вывода.

Первое допущение состоит в том, что некий замкнутый объем мгновенно заполняется радоном в количестве N_0 атомов. В природе такая ситуация в чистом виде не реализуется, чего не скажешь о лабораторных условиях.

Второе допущение более сильное — атомы радона претерпевают распад за различное время, предсказать которое заранее нельзя. Поэтому можно считать, что число атомов, распадающихся за время dt , пропорционально как числу имеющихся не распавшихся на данный момент времени атомов N , так и промежутку времени dt . Из этого допущения следует, что для физиков-ядерщиков все атомы радона неразличимы вне зависимости от их возраста. Исходя из этого в данном исследовании также будет принято, что все атомы одинаковые.

На представленных допущениях строится дифференциальное уравнение:

$$-dN = \lambda N dt, \quad (3)$$

интегрирование которого дает основной закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Как видно, число N не распавшихся на момент времени t атомов экспоненциально убывает со временем.

Физические модели накопления радона в помещениях зданий и сооружений

Сколько атомов радона должно находиться в 1 м³ воздуха, чтобы его активность составила 1 Бк/(м³·с)? Рассмотрим модельную ситуацию: активность радона в помещении по данным измерений в среднем составляет $A=1$ Бк/(м³·с). По формуле (2) можно вычислить количество атомов радона-222, которое должно находиться в одном кубическом метре воздуха, чтобы в среднем один раз в каждую секунду происходил распад одного из атомов $\lambda=2,0974 \cdot 10^{-6}$:

$$N = \frac{A}{\lambda}; \quad N = \frac{1 \cdot 1000000}{2,0974} = 476780 \text{ атомов радона-222 в } 1 \text{ м}^3 \text{ воздуха.}$$

Такое большое число не должно удивлять.

Аналогичный расчет выполним для двух других изотопов радона:

$$\text{Торон (радон-220), } \lambda=1,27 \cdot 10^{-2}: \\ N = \frac{1 \cdot 100}{1,27} = 78,7 \text{ атома торона в } 1 \text{ м}^3 \text{ воздуха.}$$

$$\text{Актион (радон-219), } \lambda=0,177: \\ N = \frac{1}{0,177} = 5,65 \text{ атома актиона в } 1 \text{ м}^3 \text{ воздуха.}$$

Итак, чем короче период полураспада (см. таблицу), тем меньше величина постоянной распада λ и тем меньше атомов требуется для обеспечения активности 1 Бк/(м³·с).

Распад с замещением выбывших атомов. Рассмотрим, что произойдет, если при активности $A=1$ Бк/(м³·с) каждый распад будет сопровождаться поступлением извне в выбранный нами кубический метр воздуха одного атома радона-222. Тогда каждую секунду будем иметь $N=N_0$; количество атомов, несмотря на распады, остается одинаковым, и основной закон радиоактивного распада не действует. От него остается только величина N_0 — начальное количество 476780 атомов радона при $t=0$. До тех пор пока каждый распавшийся атом будет в ту же секунду замещаться другим атомом, активность радона в воздухе помещения будет стабильно равна единице.

При любой другой активности радона-222, например $A=100$ Бк/(м³·с), необходимое количество атомов радона увеличивается в 100 раз $N=N_0=47,678$ млн, в каждую секунду распадается 100 атомов и столько же приходит извне, замещая распавшиеся.

Интенсивность поступления радона в помещения из материалов ограждающих конструкций

Ранее был проведен ряд исследований, посвященных изучению радона в помещениях, его влиянию на жизнь человека и др. [3–10].

Цитируем п. 1.6 Пособия [10]: «1.6. В абсолютном большинстве случаев доминирующая часть суммарных поступлений радона в помещения формируется вследствие проникновения выделяемого в грунте радона через граничащие с ним (помещением) конструкции и выделений радона в материалах конструкций». То же самое указано в п. 4.2 того же Пособия [10].

В п. 1.5 Пособия [10] указано, что «удельные поступления в здания радона, выделяющегося в материалах ограждающих конструкций (перекрытий, внутренних стен и перегородок), обычно не превышают $3 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (табл. 1.1)».

Здесь необходимо разъяснение: в научной и нормативной литературе величина, указанная выше, называется плотностью потока радона, обозначение ППР. Указанное количественное значение читается так: ППР с внутренних поверхностей ограждающих конструкций равна 3 мБк (распада) в секунду с 1 м^2 поверхности; иначе: $3 \cdot 10^{-3} \text{ Бк}$ в секунду с 1 м^2 ; иначе: три распада атомов радона в течение 1000 с, или один распад за 333 с.

Из этих данных непонятно, стоит ли учитывать поступающий из конструкций радон как фактор замещения выбывших (распавшихся) атомов и накопления радона в помещении. Для того чтобы это выяснить, проводим расчет количества атомов радона, поступающих в помещение каждую секунду.

Сначала строится модель помещения. Произвольно зададим его размеры. Пусть его длина, ширина и высота равны соответственно $5 \times 5 \times 3 \text{ м}$. Тогда суммарная площадь ограждающих конструкций, излучающих радон, составит 110 м^2 , а объем модельного помещения 75 м^3 . Далее вводим коэффициент:

$$K = \frac{S}{V}, \quad (5)$$

где S — площадь ограждающих конструкций, м^2 ; V — объем помещения, м^3 .

Для нашей произвольно выбранной модели помещения числовое значение коэффициента составит:

$$K = \frac{110}{75} = 1,47,$$

т. е. в каждый метр кубический объема модельного помещения радон поступает с $1,47 \text{ м}^2$ строительных конструкций.

Количество атомов радона, поступающих в 1 м^3 объема помещения в секунду, составляет:

$$N = K \frac{A}{\lambda};$$

$$N = 1,47 \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2,0974} = 2100 \text{ атомов в секунду.}$$

Итак, наибольшее количество атомов, поступающих извне в 1 м^3 воздуха помещений в секунду, необходимое для замещения распавшихся, не превышает $100 \text{ шт}/\text{с}$. Легко видеть, что в примере 100 атомов уйдут на замещение атомов, выбывших в результате распада, а оставшиеся 2000 пойдут на накопление.

Интенсивность поступления атомов радона из грунта в замкнутый объем

Нормативные документы [11–13] устанавливают предельное значение плотности потока радона с 1 м^2 поверхности грунта, равное $80 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. При превышении этой величины «... в проекте должна быть предусмотрена система защиты здания от повышенных уровней гамма-излучения и радона».

Модельное помещение выберем в виде подвала высотой 2 м с земляным полом. Тогда каждый квадратный метр земляной поверхности излучает радон в объеме 2 м^3 . Плотность потока радона примем равной $60 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, меньше предельного значения, допускаемого нормами. Т. е. каждый кубический метр объема подвала ежесекундно получает $30 \text{ мБк}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$, или $0,03 \text{ Бк}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

Количество атомов радона, поступающих в каждый кубический метр объема подвала в секунду, составляет:

$$N = \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot 10^6}{2,0974} = 21000 \text{ атомов в секунду.}$$

Результат, аналогичный предыдущему расчету, только в десять раз больше.

Обсуждение

Исходя из вышеизложенного можно заключить, что даже того сверхмалого количества атомов радона-222, который выделяется внутренними поверхностями помещений, с избытком хватает не только на замещение, но и на увеличение N_0 . Тогда что произойдет при проветривании помещений и как оценить результат? Для этого нужно вернуться к выводам предыдущей статьи автора [14] об ультраразреженности атомов радона-222, об их ничтожно малом количестве в природе.

В наружном воздухе проветривания всегда найдется несколько сотен или тысяч атомов радона (в расчете на 1 м^3). Пусть их количество составит 10^4 атомов, тогда по формуле (1) величину активности A получим умножением 10^4 на $2,0974$ и делением на 10^6 . Получим $A = 0,020974 \text{ Бк}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ — величину не измеримую ни одним прибором в принципе. Который раз убеждаемся в истине слов Энрике Ферми: «Нет ничего практичнее хорошей теории». В нашем случае его слова подтверждаются полностью.

Итак, вокруг нас происходят нерегистрируемые события, о которых никто не знает и знать не может. Все это следствие ультраразреженности радона-222 в природе. И только теория способна разобраться, найти закономерности в этих процессах и объяснить, казалось бы, необъяснимые факты, а также указать на возможные опасные проявления для жизни и здоровья людей, что составляет предмет строительной физики.

Выводы

1. Результаты, полученные в ходе данной работы, не используют никаких дополнительных предположений о явлениях переноса: импульса, вещества,

энергии, электрического и т. п., в том числе диффузии атомов радона. Это научный результат, открывающий новое научное направление в создании теории радонового режима зданий и сооружений.

2. Дальнейшие исследования следует направить на обобщение полученных результатов в частности, следует абстрагироваться от конкретных размеров модельных помещений и от конкретных источников поступления радона в помещения.

Список литературы

1. Сердюкова А.С., Капитанов Ю.Т. Изотопы радона и продукты их распада в природе. Изд. 2-е. М.: Атомиздат. 1975. 206 с.
2. Алешкевич В.А. Курс общей физики. Молекулярная физика. М.: ФИЗМАТГИЗ. 2016. 312 с.
3. Гулябянц Л.А., Заболотский Б.Ю. Плотность потока радона как критерий оценки радоноопасности // *АНРИ*. 2004. № 3. С. 16–20.
4. Гулябянц Л.А., Лившиц М.И. Расчет концентрации радона в помещениях проектируемых зданий // *АНРИ*. 2007. № 4. С. 9–13.
5. Ильичев В.А., Кулачкин Б.И., Кушнир Л.Г., Радкевич А.И., Ставницер Л.Р., Шейнин В.И. Экологические проблемы радона в строительстве // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1994. № 5. С. 26–28.
6. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат. 1989. 120 с.
7. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Перо. 2016. 394 с.
8. Гулябянц Л.А. Противорадоновая защита жилых и общественных зданий. Ч. 1 // *Жилищное строительство*. 2012. № 2. С. 28–31.
9. Гулябянц Л.А. Противорадоновая защита жилых и общественных зданий (Пособие по проектированию, проект). Ч. II // *Жилищное строительство*. 2012. № 3. С. 27–31.
10. Гулябянц Л.А. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. М.: «ФЭН-НАУКА», 2013. 52 с.
11. МГСН 2.02–97 Допустимые уровни ионизирующего излучения и радона на участках застройки. Срок действия с 01 февраля 1977 г. Москва. 1977. 18 с.
12. Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2009. 100 с.
13. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010): (Ионизирующее излучение, радиационная безопасность СП 2.6.1. 2612–10): зарегистрирован 11 августа 2010 г. Регистрационный № 18115. М.: Минюст России, 2010. 98 с.
14. Абрамов В.Е. Степень разрежения радона в атмосфере // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2019. № 6 (1018). С. 34–35.

References

1. Serdyukova A.S., Kapitanov Yu.T. Izotopy radona i produkty ikh raspada v prirode [Radon isotopes and their decay products in nature]. Moscow: Atomizdat. 1975. 206 p.
2. Aleshkevich V.A. Kurs obshchei fiziki. Molekulyarnaya fizika [General physics course. Molecular physics]. Moscow: FIZMATGIZ. 2016. 312 p.
3. Gulabyants L.A., Zabolotsky B.Yu. Radon flux density as a criterion for assessing radon hazard. *ANRI*. 2004. No. 3, pp. 16–20. (In Russian).
4. Gulabyants L.A., Livshits M.I. Calculation of radon concentration in the premises of designed buildings. *ANRI*. 2007. No. 4, pp. 9–13. (In Russian).
5. Ilyichev V.A., Kulachkin B.I., Kushnir L.G., Radkevich A.I., Stavnitsler L.R., Sheinin V.I. Ecological problems of radon in construction. *Osnovaniya, fundamentey i mekhanika gruntov*. 1994. No. 5, pp. 26–28. (In Russian).
6. Krisyuk E.M. Radiatsionnyi fon pomeshchenii [Radiation background of the premises]. Moscow: Energoatomizdat. 1989. 120 p.
7. Marenniy A.M., Tsapalov A.A., Miklyaev P.S., Petrova T.B. Zakonomernosti formirovaniya radonovogo polya v geologicheskoi srede [Patterns of formation of a radon field in a geological environment]. Moscow: Pero. 2016. 394 p.
8. Gulabyants L.A. Anti-radon protection of residential and public buildings. Part 1. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2012. No. 2, pp. 28–31. (In Russian).
9. Gulabyants L.A. Anti-radon protection of residential and public buildings (Design manual, project). Part II. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2012. No. 3, pp. 27–31. (In Russian).
10. Gulabyants L.A. Posobie po proektirovaniyu protivoradonovoi zashchity zhilykh i obshchestvennykh zdaniy [A guide for the design of anti-radon protection of residential and public buildings.]. Moscow: «FEN-NAUKA». 2013. 52 p.
11. MGSN 2.02–97 Permissible levels of ionizing radiation and radon in building sites. Validity from February 01, 1977, Moscow. 1977. 18 p. (In Russian).
12. Radiation Safety Standards. NRB-99/2009. Sanitary and epidemiological rules and regulations. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor. 2009. 100 p. (In Russian).
13. Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (OSPORB-99/2010): (Ionizing radiation, radiation safety SP 2.6.1. 2612–10): registered on August 11, 2010. Registration No. 18115. Moscow: Ministry of Justice of Russia. 2010. 98 p. (In Russian).
14. Abramov V.E. The degree of rarefaction of radon in the atmosphere. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2019. No. 6 (1018), pp. 34–35. (In Russian).

22-24 СЕНТЯБРЯ / 2020

III МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ»

Организаторы конференции



INTERNATIONAL
ASSOCIATION OF
FOUNDATION
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Место проведения:

СОЧИ,
Маринс Парк Отель,
конференц-зал «Ялта»,
переулок Морской, 2

Генеральный спонсор



Генеральные информационные партнеры

Гидротехника
НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ

ФУНДАМЕНТЫ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВЩИКОВ И СТРОИТЕЛЕЙ

**Строительная
газета**
ИНВЕСТИЦИИ | ПРОИЗВОДСТВО | АРХИТЕКТУРА | ЖКХ

www.fc-union.com, info@fc-union.com

тел.: +7 (495) 66-55-014, моб.: +7 916 36-857-36



7–8 ОКТЯБРЯ 2020 г.
РОСТОВ-НА-ДОНУ. РОССИЯ
Marins Park Hotel Rostov



7–8 on OCTOBER, 2020
ROSTOV-ON-DON. RUSSIA
Marins Park Hotel Rostov

THE SCIENTIFICALLY-PRACTICAL CONFERENCE
«DEVELOPMENT OF THE CERAMIC INDUSTRY OF RUSSIA»

KERAMTEX



**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ:
СИМПОЗИУМ «НАУКА – КЕРАМИЧЕСКОМУ ПРОИЗВОДСТВУ»
6 октября 2020 г.**

**SPECIAL PROJECT: SYMPOSIUM «THE SCIENCE – FOR CERAMIC PRODUCTION»
6 on OCTOBER, 2020**

Партнеры МИАП KERAMTEX / KERAMTEX' partners



**Посещение завода «Донской кирпич» и предприятий ГК UNITILE
«Шахтинская плитка» и «Шахтинские смеси»**

Visit to brick-plant «Donskoy kirpich» and The Unitile Group of Companies
Уникальный Музей кирпича / the brick Museum

www.rifsm.ru

mail@rifsm.ru

www.journal-cm.ru