

Учредитель журнала:
 ООО Рекламно-издательская
 фирма «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»
 Журнал зарегистрирован
 Министерством РФ по делам
 печати, телерадиовещания
 и средств массовой информации
 ПИ №77–1989
Входит в Перечень ВАК
 и государственный
 проект РИНЦ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

№9

Основан в 1955 г.

(729) сентябрь 2015 г.

Главный редактор:

ЮМАШЕВА Е. И.,
 инженер-химик-технолог,
 почетный строитель России

Редакционный совет:

РЕСИН В. И.,
 председатель, д-р экон. наук,
 профессор, академик РААСН (Москва)

БАРИНОВА Л. С.,
 канд. хим. наук, вице-президент
 Российского союза строителей (Москва)

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

БУТКЕВИЧ Г. Р.,
 канд. техн. наук, член правления
 Ассоциации «Недра» (Москва)

ВАЙСБЕРГ Л. А.,
 д-р техн. наук, профессор,
 член-корреспондент 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)

ЖУРАВЛЕВ А. А.,
 Президент Ассоциации «Недра» (Москва)

КОРОЛЕВ Е. В.,
 д-р техн. наук, профессор (Москва)

КРАСОВИЦКИЙ Ю. В.,
 д-р техн. наук, профессор (Воронеж)

КРИВЕНКО П. В.,
 д-р техн. наук, профессор (Украина)

ЛЕОНИЧ С. Н.,
 д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

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

ОРЕШКИН Д. В.,
 д-р техн. наук, профессор (Москва)

ПИЧУГИН А. П.,
 д-р техн. наук, профессор
 (Новосибирск)

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

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

ФИШЕР Х.-Б.,
 доктор-инженер (Германия)

ХЕЛМИ Ш. С.,
 канд. техн. наук (Египет)

ХОЗИН В. Г.,
 д-р техн. наук, профессор (Казань)

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

ШЛЕГЕЛЬ И. Ф.,
 канд. техн. наук (Омск)

ЯКОВЛЕВ Г. И.,
 д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

**К проведению 19-го Международного конгресса
по строительным материалам ibasil**

Е.М. ЧЕРНЫШОВ, Г.С. СЛАВЧЕВА, Л.В. КИМ

**О конструкционном потенциале структуры высокотехнологичных бетонов
с учетом температурно-влажностных эксплуатационных состояний** 3

В.С. ЛЕСОВИК, Л.Х. ЗАГОРОДНЮК, И.Л. ЧУЛКОВА,
 А.Д. ТОЛСТОЙ, А.А. ВОЛОДЧЕНКО

**Сродство структур как теоретическая основа проектирования
композитов будущего** 18

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, Е.В. КОРОЛЕВ

**Деформации высокопрочных легких бетонов
на полых микросферах и способ их снижения** 23

М. САБЕР, К.А. САРАЙКИНА, Г.И. ЯКОВЛЕВ, А. ШЕРИФ,
 С. АБД ЭЛЬНАБИ, Ш. ХЕЛЬМИ

Прочность при сдвиге армированного базальтопластиком (АБП) бетона 31

Г.В. НЕСВЕТАЕВ, Г.С. КАРДУМЯН

**Влияние собственных деформаций на пористость
и свойства цементного камня** 38

В.Г. СОЛОВЬЕВ, А.Ф. БУРЬЯНОВ, Х.-Б. ФИШЕР

**Особенности формирования структуры сталефибробетона
при тепловой обработке** 43

С.В. ФЕДОСОВ, А.А. КОТКОВ, В.Е. МИЗОНОВ, Н.Н. ЕЛИН

**Моделирование кинетики сушки листового материала
при реверсивной подаче сушильного агента** 47

Результаты научных исследований

Г.С. СЛАВЧЕВА

**Структурные факторы обеспечения морозостойкости
цементных пенобетонов** 53

С.И. ВАЙТКУС, И.Я. ГНИП

**Исследование релаксации напряжения в полистирольном пенопласте
в условиях одноосного сжатия с использованием
математико-статистического планирования эксперимента** 57

М.С. ЛЕБЕДЕВ, И.В. ЖЕРНОВСКИЙ, Е.В. ФОМИНА, А.Е. ФОМИН

**Особенности использования глинистых пород при производстве
строительных материалов** 67

© ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,
 журнал «Строительные материалы»®, 2015

Адрес редакции: Россия, 127434, Москва,
 Дмитровское ш., д. 9, стр. 3
Тел./факс: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36
E-mail: mail@rifsm.ru **http://www.rifsm.ru**

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации. Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора. Перепечатка и воспроизведение статей, рекламных и иллюстративных материалов возможны лишь с письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за содержание рекламы и объявлений.

Founder of the journal:
«STROYMATERIALY»
Advertising-Publishing Firm, OOO

The journal is registered
by the RF Ministry of Press,
Broadcasting and Mass
Communications,
PI № 77-1989

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROYMATERIALY®

Founded in 1955

MATERIALY® No. 9

(729) September 2015 r.

Editor-in-chief

YUMASHEVA E.,
engineer-chemist-technologist,
Honorary Builder of Russia

Editorial Board

RESIN V.,
Chairman, Doctor of Sciences (Economy),
Professor (Moscow)

BARINOVA L.,
Candidate of Sciences (Chemistry), Vice-
President of the Russian Union of Builders
(Moscow)

BUR'YANOV A.,
Doctor of Sciences (Engineering), Director
of the Russian Association of gypsum
(Moscow)

BUTKEVICH G.,
Candidate of Sciences (Engineering),
member of the Board of Association
«Nedra» (Moscow)

VAYSBERG L.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Corresponding Member of RAS
(St. Petersburg)

VERESHCHAGIN V.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Professor (Tomsk)

GORIN V.,
Candidate of Sciences (Engineering),
President of the Union of Haydite and
Haydite Concrete Producers (Samara)

ZHURAVLEV A.,
President of the Association «Nedra»
(Moscow);

KOROLEV E.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Professor (Moscow)

KRASOVITSKY Yu.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Professor (Voronezh)

KRIVENKO P. V.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Professor (Ukraine)

LEONOVICH S.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Professor (Belarus, Minsk)

LESOVIK V.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Corresponding Member of RAACS
(Belgorod)

ORESHKIN D.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Professor (Moscow)

PICHUGIN A.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Professor, Member of the Russian Academy
of Natural Sciences (Novosibirsk),

PUKHARENKO Yu.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Professor (St. Petersburg)

FEDOSOV S.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Professor, Academician of RAACS (Ivanovo)

KHOZIN V.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Professor (Kazan)

CHERNYSHOV E.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Professor, Academician of RAACS
(Voronezh)

SHLEGEL I.,
Candidate of Sciences (Engineering),
OOO «INTA-Stroy» (Omsk)

YAKOVLEV G.,
Doctor of Sciences (Engineering),
Professor (Izhevsk)

FISHER H.-B.,
Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

KHELMI Sh. S.,
Candidate of Sciences (Engineering)
(Egypt, Cairo)

To Holding the 19th International Congress on Building Materials ibausil

E.M. CHERNYSHOV, G.S. SLAVCHEVA, L.V. KIM

**About Constructional Potential of High-Tech Concretes Structures
with Due Regard for Temperature-Humidity Operational Conditions 3**

V.S. LESOVIK, L.H. ZAGORODNYUK, I.L. CHULKOVA,
A.D. TOLSTOY, A.A. VOLODCHENKO

**Affinity of structures as a theoretical basis for designing composites
of the future 18**

A.S. INOZEMTCEV, E.V. KOROLEV

**Deformations of High-Strength Lightweight Concrete Having
Hollow Microspheres and Method of Reduce Them 23**

M. SABER, K. SARAYKINA, G. YAKOVLEV, A. SHERIF, S. ABD ELNABY, S. HELMY

**Shear strength of concrete reinforced with basalt fiber
reinforced polymer bars (BFRP) 31**

G.V. NESVETAEV, G.S. KARDUMYAN

Influence of strain on own porosity and properties of cement stone 38

V.G. SOLOVEV, A.F. BURYANOV, H.-B. FISCHER

**Features of structure formation during heat treatment of steel fiber
reinforced concrete. 43**

S.V. FEDOSOV, A.A. KOTKOV, V.E. MIZONOV, N.N. YELIN

Simulation of drying kinetics of sheet material at reversible supply of drying gas 47

Results of scientific research

G.S. SLAVCHEVA

Structural Factors Ensuring the Frost Resistance of Cement Foam Concretes 53

S.I. VAITKUS, I.J. GNIP

**Research of expanded polystyrene (EPS) stress relaxation under
uniaxial loading conditions using statistical design method of experiments 57**

M.S. LEBEDEV, I.V. ZHERNOVSKIY, E.V. FOMINA, A.E. FOMIN

Features of Clay Rocks Application when Construction Material Production 67

Editorial address: 9/3 Dmitrovskoye Highway,
127434, Moscow, Russian Federation
Tel./fax: (499) 976-22-08, 976-20-36
Email: mail@rifsm.ru http://www.rifsm.ru

The authors of published materials are responsible for the accuracy of the submitted information, the accuracy of the data from the cited literature and for using in articles data which are not open to the public. The Editorial Staff can publish the articles as a matter for discussion, not sharing the point of view of the author. Reprinting and reproduction of articles, promotional and illustrative materials are possible only with the written permission of the editor-in-chief. The Editorial Staff is not responsible for the content of advertisements and announcements.

УДК 691.327

Е.М. ЧЕРНЫШОВ¹, д-р техн. наук, академик РААСН (chem@vgasu.vrn.ru),
Г.С. СЛАВЧЕВА¹, д-р техн. наук (gslavcheva@yandex.ru); Л.В. КИМ², канд. техн. наук (kimlv2@yandex.ru)

¹ Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84)

² Инженерная школа Дальневосточного федерального университета (690922, г. Владивосток, ОПС Русский-2, ДВФУ, корп. 12)

О конструкционном потенциале структуры высокотехнологичных бетонов с учетом температурно-влажностных эксплуатационных состояний

Представлена обобщенная интерпретация механизма взаимосвязи прочности, закономерностей влажностного деформирования и морозостойкости бетонов с их температурно-влажностным состоянием. Представлена система структурных характеристик, влияющих на проявление и реализацию конструкционного потенциала материала. Обобщение результатов исследований позволило выявить взаимосвязь между параметрами состава и структурой высокотехнологичных бетонов и реализацией их конструкционного потенциала в различном температурно-влажностном состоянии.

Ключевые слова: высокотехнологичные бетоны, структура, прочность, влажностные деформации, морозостойкость.

E.M. CHERNYSHOV¹, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS (chem@vgasu.vrn.ru),

G.S. SLAVCHEVA¹, Doctor of Sciences (Engineering) (gslavcheva@yandex.ru); L.V. KIM², Candidate of Sciences (Engineering) (kimlv2@yandex.ru)

¹ Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering(84, 20-letija Oktjabrja Street, 394006, Voronezh, Russian Federation)

² School of Engineering of the Far Eastern Federal University (Far Eastern Federal University, Housing 12, OPS Russian-2, Vladivostok, 690922, Russian Federation)

About Construction Potential of High Performans Concretes Structures with Due Regard for Temperature-Humidity Operational Conditions

A generalized interpretation of the mechanism of interrelation of strength, regularities of humidity deformation and frost-resistance of concretes with their temperature-humidity state is presented. The system of structural characteristics influencing on the manifestation and realization of the structural potential of the material is also presented. The generalization of the study results makes it possible to reveal the interrelation between parameters of composition and structure of high performans concretes and the realization of their structural potential under various temperature-humidity conditions.

Keywords: high performans concretes, structure, strength, humidity deformations, frost-resistance.

К обсуждению предлагается материаловедческая проблема закономерностей поведения современных высокотехнологичных бетонов в эксплуатационном цикле, с которой прямо связаны вопросы реализации потенциала сопротивления их структуры разрушению при действии температурно-влажностных факторов среды в возникающих вариантах состояний материала в конструкциях.

Актуальность проблемы

На первый взгляд название публикации и ее ключевые слова не несут в себе ничего нового и оригинального и не являются чем-то достаточно актуальным и значимым. Действительно, проблема конструкционного потенциала бетонов как функции их температурно-влажностного состояния более полувека является предметом рассмотрений, исследований и разработок. Обобщенно это отражено в фундаментальных трудах специалистов по теории расчета, проектирования и применения строительных конструкций (труды С.В. Александровского, О.Я. Берга, В.М. Бондаренко, К.З. Галустова, Е.А. Гузеева, Ю.В. Зайцева, В.И. Ильинского, Н.И. Карпенко, Б.Д. Колотилкина, В.И. Колчунова, В.И. Морозова, В.М. Москвина, К.А. Пирадова, И.Е. Прокоповича, В.С. Федорова и др. [1–9]) и получило регламентацию в строительных нормах.

Принимая имеющиеся достижения в качестве базовых, вместе с тем акцентируем внимание на необходимости развития и актуальности формирования новых подходов к обозначенной проблеме. Обоснованность этого диктуется следующими обстоятельствами и соответствующими им положениями.

Первое и определяющее из них касается понятия «высокотехнологичные бетоны», к которым относятся

It is proposed to discuss the material science issue of behavior regularities of modern high performans concretes (HPC) during their operating cycle; problems of the realization of resistance potential of their structures to deterioration under the effect of temperature-humidity factors of environment in arising variants of the material condition in structures are directly connected with this issue.

Problem Statement and its actuality

At first glance, the title of the publication and its key words don't contain anything new and original and are not sufficiently actual and meaningful. Truly, the issue of structural potential of concretes, as a function of their temperature-humidity conditions, is the subject of consideration, research and development more than half a century. Generally, this has been reflected in the fundamental works of specialists on the theory of computation, design, and application of building structures (works by S.V. Alexandrovsky, O.Ya. Berg, V.M. Bondarenko, K.Z. Galustov, E.A. Guzeev, Yu.V. Zaytsev, V.I. Il'insky, N.I. Karpenko, B.D. Kolotilkin, V.I. Kolchunov, V.I. Morozov, V.M. Moskvina, K.A. Piradov, I.E. Prokopovich, V.S. Fedorov et. al. [1–9]) and got the regulation in building codes.

Taking the existing achievements as basic ones, along with it, we focus attention on the need for development and the relevance of the formation of new approaches to this problem. The validity of this is dictated by the following factors and regulations corresponding to them.

The first and defining of them is a term “high performans concretes”. They are concretes on the basis of binders of low water demand, filled and fine-ground cements, fast hardening and especially fast hardening cements as well as super and hyper-plasticized, hyper-pressed, porous, superfine (powder), fiber-reinforced concretes and concretes of last genera-

Таблица 1
Table 1

Уровень конструкционных свойств традиционных и высокотехнологичных цементных бетонов [4]

Level of Structural Properties of Traditional and High Performans Cement Concretes [4]

Конструкционные свойства Structural Properties	Значения для бетонов Values for concretes	
	традиционных traditional	высокотехнологичных high performans
Средняя плотность, кг/м ³ Average density, kg/m ³	2250–2300	2400–2450
Предел прочности при сжатии, МПа Ultimate compressive strength, MPa	40–60	до 125–150
Модуль упругости, МПа Modulus of elasticity, MPa	(32–35)·10 ³	(45–50)·10 ³
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа Ultimate tensile strength in bending, MPa	4,7–4,9	10,5–11,5
Отношение $R_{изг}/R_{сж}$ Ratio R_{bend}/R_{comp}	0,13–0,14	0,08–0,09
Коэффициент Пуассона Poisson's Ratio	0,20–0,21	0,14–0,15
Предел трещинообразования Limit of cracking	0,5–0,6	0,85–0,9
Предельная растяжимость, мм/м Ultimate elongation, mm/m	1,1–1,2	0,7–0,8
Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} , МН/м ^{3/2} Critical stress intensity factor, K_{IC} , MN/m ^{3/2}	0,85–0,95	0,7–0,8
Удельная энергия разрушения, Дж/м ² Specific crushing energy, Joule/m ²	75–80	280–300

бетоны на основе вяжущих низкой водопотребности, наполненных и тонкомолотых цементов, быстротвердеющих и особо быстротвердеющих цементов, а также бетоны супер- и гиперпластифицированные, гиперпрессованные, поризованные, высокодисперсные (порошковые), дисперсно-армированные, бетоны последних поколений, получаемые с введением в их состав микро- и наноразмерных структурных составляющих. Особенностью всех этих бетонов является то, что достигаемый на момент изготовления существенно более высокий уровень показателей конструкционных свойств (табл. 1) определяется принципиально отличной от традиционных бетонов структурой (табл. 2). Эта структура, формируемая на принципах механофизико-химической и нанохимической технологических платформ [10], характеризуется другим масштабно-размерным типом, более высокой энергетической неравновесностью и, как следствие, активным ее проявлением в эксплуатационных условиях, в том числе и прежде всего при действии температурно-влажностных факторов среды [11–13].

Повышенная активность структур связана с развитой площадью поверхности раздела фаз в нано-, микро- и мезомасштабном диапазоне строения бетона, особенностями размерно-геометрических параметров пористости с высокой объемной долей в ней нано- и микропор. Все это сильно меняет кинетические и энергетические параметры гигромеханики взаимодействия материала с водяным паром и водой в процессах адсорбции-десорбции, капиллярной конденсации, водонасыщения-обезвоживания [7–9, 13]. В целом создается другая картина баланса сил при изменении температурно-влажностных параметров материала и соответственно другая картина напряженно-деформированного состояния структуры высокотехнологичных бетонов в сравнении с традиционными классическими бетонами.

Учитывая вышеизложенное, наука и практика материаловедения должны быть готовы к проблемам применения (применимости) высокотехнологичных бетонов в нестандартных и экстремальных условиях эксплуатации конструкций из них, для чего необходимо знать особенности и закономерности механики реализации конструкционного потенциала их специфичной структуры.

В контексте обсуждения проблемы следует обратиться ко второму положению в ее постановке и обоснованности актуальности.

Это второе положение касается того, что осуществленные ранее исследования конструкционного потенциала бетонов базируются преимущественно на феноменологическом подходе, преследующем цель получения количественной информации о мере, степени влияния и коэффициентах изменения механических свойств бетона в различных температурно-влажностных его состояниях как квазигомогенной системы. Феноменологический подход с практической точки зрения вполне удовлетворяет специалистов по расчету и проектированию конструкций и сегодня, так как позволяет учитывать и нормировать влияние температурно-влажност-

tions produced by introducing micro- and nano-sized structural components into their compositions.

The peculiarity of all these concretes is a higher level of their structural properties (Table 1) achieved by the moment of production which is characterized by the structure fundamentally different from traditional concretes (Table 2). This structure, formed on the principles of mechanical-physical-chemical and nano-chemical technological platforms [10], is characterized by a different scale- dimensional type, higher energy non-equilibrium and, as a consequence, by its active manifestation under operational conditions, including primarily under the effect of temperature-humidity environmental factors [11–13].

The increased activity of structures is associated with the developed area of the phase interface within the nano-, micro- and meso-scale range of the concrete structure, peculiarities of dimension-geometric parameters of porosity with a high volume fraction of nano- and micro-pores in it.

All this strongly changes the kinetic and energetic parameters of hygromechanics of interaction of the material with water steam and water in the processes of adsorption and desorption, capillary condensation, water saturation-dehydration [7–9, 13]. In general, there is a different picture of the force balance when changing the temperature-humidity parameters of the material and, correspondingly, a different picture of the stress-strain state of structures of high performans concretes in comparison with traditional classical concretes.

Having in mind above mentioned, the science and practice of the materiology should be ready for problems of the application (applicability) of high performans concretes under non-standard and extreme conditions of operation of structures made of these concretes, for this, it is necessary to know peculiarities and regularities of the mechanics of implementation of the structural potential of their specific structures.

Таблица 2
Table 2

Основные отличительные характеристики состава и структуры традиционных и высокотехнологичных цементных бетонов
Main Distinguishing Characteristics of Composition and Structure of Traditional and High Performans Cement Concretes

Отличительные характеристики Distinguishing Characteristics	Значения для бетонов Values for concretes	
	традиционных R _т ≅40–60 МПа Traditional R _т ≅40–60 МПа	высокотехнологичных R _в ≥80–100 МПа High performans R _в ≥80–100 МПа
Количество компонентов смеси The number of mix components	4–5	6–8
Наибольшая крупность зернистых частиц, мм The largest size of grain particles, mm	20–70	1–5
Общий масштабно-размерный тип структуры Overall scale-dimension type of structure	Крупнозернистый Coarse	Мелкозернистый, микрозернистый Fine-grained, micro-grained
Суммарное количество зернистых частиц в единице объема, шт./м ³ Total number of grain particles in a volume unit, pc/m ³	до (2–2,2)·10 ⁶ to (2–2,2)·10 ⁶	(0,8–1)·10 ²¹
Суммарное количество вносимой зернистыми частицами поверхностной энергии, кДж/м ³ Total quantity of surface energy introduced by grain particles, kJ/m ³	18–20	2000–2500
Расход цемента (вяжущего вещества), кг/м ³ Cement consumption (binding agent), kg/m ³	300–400	400–600
Средняя плотность цементного камня (микробетона), кг/м ³ Average density of cement stone (micro-concrete), kg/m ³	1650–1800	2300–2350
Объем твердой фазы микробетона, м ³ /м ³ Volume of micro-concrete hard phase, m ³ /m ³	0,57–0,65	0,75–0,79
Объем пор микробетона, м ³ /м ³ Volume of micro-concrete pores, m ³ /m ³	0,35–0,43	0,21–0,25
Относительное содержание пор радиусом менее 20 нм в общем объеме пор, % Relative content of pores of radius less than 20 nm in the total volume of pores, %	25–30	>40

ного фактора среды, вводить корректировки по показателям реализации конструкционного потенциала бетонов в эксплуатационном цикле. Но он не вполне отвечает возможностям современного материаловедения и современных высоких технологий по конструированию бетонов как композитных систем с новым уровнем качества, новым потенциалом сопротивления разрушению.

Реально бетон является структурированной системой, поэтому практическое достижение новых возможностей должно основываться на другом подходе в оценке конструкционного потенциала материала – на концепциях и методологии системно-структурного материаловедения. Этот подход позволяет перейти к сущностному рассмотрению причинно-следственных отношений свойств с составом, структурой и состоянием материала; он способен обеспечить решение задач эффективной реализации потенциала бетонов нового поколения в разнообразных моделях напряженно-деформированного их состояния в конструкциях, работающих в том числе в экстремальных температурно-влажностных режимах.

Именно с учетом изложенного авторы обращаются в данной публикации к анализу научных материаловедческих оснований проблемы реализации конструкционного потенциала структур высокотехнологичных бетонов.

Концептуально-методологические положения системно-структурного материаловедения и технологии строительных композитов

Положения современного системно-структурного материаловедения строительных композитов и их технологии определяют рассмотрение обсуждаемой проблемы в рамках следующей совокупности представлений, отвечающих концепциям:

1. Формула «4С»: «состав – структура – состояние – свойства».
2. Система «материал – конструкция – среда».
3. Категория «жизненного цикла материала и конструкций».
4. Механика проявления и реализации конструкционных свойств материалов.

Центральным моментом методологии управления качеством строительных материалов и конструкций следует считать *логическую связь «состав – структура – состояние – свойства» (формула «4С»)*, отвечающую предмету изучения и фундаментальному закону материаловедения о зависимости свойств материала от строения.

В отношении конгломератных строительных композитов, каковыми являются бетоны, концепция «4С» получила системную постановку и специальное рассмотрение [14], в связи с чем на данном вопросе детально не останавливаемся.

Определяющим постулатом методологии структурного материаловедения принимается *система «материал – конструкция – среда»*. Система характеризуется

In the context of the discussion of the problem it is necessary to refer to the second position in its definition and justification of relevance.

This second position concerns the fact that the research in structural potential of concretes carried out earlier is based mainly on the phenomenological approach aimed at obtaining the quantitative information on the measure, influence degree and coefficients of changing mechanical properties of concrete at its various temperature-humidity states as a quasi-homogeneous system. The phenomenological approach quite satisfies the specialists in calculation and design of structures from practical point of view even today, as makes it possible to take into account and standardize the influence of the temperature-humidity factor of environment, to enter the adjustment according to indicators of the implementation of the structural potential of concretes during the operational cycle. But it does not quite correspond to the potential of modern materials science and modern high technologies of concretes designing as composite systems with a new level of quality, with the new potential of fracture resistance

Actually, concrete is a structured system, so the practical achievement of new possibilities should be based on a different approach to the assessment of structural potential of the material, on the concepts and methodology of the system-

(табл. 3) как открытая термодинамическая, в которой среда воздействует с различной интенсивностью на подсистему «материал–конструкция» комплексом механических нагрузок и физико-климатических факторов, проявляющих себя в качестве движущих сил изменений и материала и конструкции. Процессы изменения состояния, структуры и свойств материала развиваются во времени под воздействием внешних и внутренних движущих сил. Внешние движущие силы оказываются обусловленными наличием неравновесного со средой теплового и вещественного состояния материала, а их величины определяются параметрами эксплуатационной среды. Вызванные внешними воздействиями процессы изменения могут продолжаться до наступления квазиравновесного состояния «материал – среда» с периодическим повторением (циклическо-стью) при смене условий среды, приводящей к нарушению такого равновесия.

В концепции и методологии структурного материаловедения и технологии в категории «жизненного цикла материала и конструкций», включающего их производство и применение, выделяются *технологический и эксплуатационный циклы*. Средством управления свойствами получаемой продукции принимается варьирование параметрами процессов структурообразования в технологическом цикле. Воздействие факторов *среды* на материал, работающий в строительной конструкции в эксплуатационном цикле, анализируется через изменение его состава, структуры и состояния. Именно в связи с этим управление качеством материала исходит из рассмотрения его состава, структуры, состояния и свойств *как на момент изготовления*, так и *«развернутых во времени»*. Последнее как раз и составляет существо и содержание проблемы реализации конструкционного потенциала структуры при эксплуатации.

Изменения в материале во времени под влиянием эксплуатационных факторов, связанные с накоплением конструктивных и деструктивных превращений, понимаются в форме процессов, описываемых вероятностно-статистическими методами, а мера допустимых изменений свойств вводится с учетом вероятности безотказной работы строительных конструкций, что основывается на положениях о предельных их состояниях.

Функция износа материала в эксплуатационном цикле принимается в виде:

$$R_b(\tau) = R_{b_0} \cdot e^{-\theta\tau}, \quad (1)$$

где R_{b_0} – исходный уровень качества материала, достигаемый в технологическом цикле; θ – коэффициент интенсивности износа материала в эксплуатационном цикле; τ – длительность действия факторов износа в эксплуатационном цикле.

Коэффициент интенсивности износа материала θ определяется его составом, структурой C и мерой неравновесности энергетического состояния, связанного с K_{3c} :

$$\theta = f(C, K_{3c}), \quad (2)$$

где C – структура; K_{3c} – коэффициент (критерий) завершенности процессов структурообразования материала в технологическом цикле.

В такой постановке критерий K_{3c} оказывается мерой возможных изменений конструкционного потенциала структуры бетона во времени.

Триада «материал – конструкция – среда» в современном материаловедении рассматривается как условие интегрирования интересов «конструкторов конструкций» и «конструкторов структур материалов». При этом материаловедение и технология строительных

структурных материалов науки. Этот подход делает возможным перейти к существенной рассмотрению причинно-следственных связей свойств с составом, структурой и состоянием материала; он способен обеспечить решение задач эффективной реализации потенциала новой генерации бетонов в многовариантных моделях их напряженно-деформированного состояния, включая структуры, работающие в экстремальных температурно-влажностных условиях.

Поэтому ввиду вышесказанного, в этой публикации авторы обращаются к анализу научных материалов, лежащих в основе проблемы реализации структурного потенциала высокоэффективных бетонных конструкций.

About conceptual-methodological provisions of system-structural materials science and technology of building composites

Провидениями современной системно-структурной материаловедения и технологии определяют рассмотрение рассматриваемой проблемы в рамках следующей комбинации идей, соответствующей следующим понятиям:

1. the formula “composition-structure-condition-properties”;
2. system “material-design-environment”;
3. the category “life cycle of material and structures”;
4. mechanics of manifestation and implementation of structural properties of materials.

Центральным моментом методологии качества контроля строительных материалов и конструкций является *логическая связь «состав-структура-условия-свойства» (формула «CSCP»)*, которая отвечает предмету и фундаментальному закону материаловедения о зависимости материальных свойств от структуры.

В отношении конгломератных строительных композитов, таких как бетоны, понятие «состав-структура-условия-свойства» получило системное и специальное рассмотрение [14], поэтому на этом этапе мы не будем останавливаться.

Система «материал-дизайн-среда» принята как определяющее постулат методологии структурной материаловедения. Эта система характеризуется (Таблица 3) как открытая, термодинамическая, в которой среда взаимодействует с подсистемой «материал-дизайн» с комплексом механических нагрузок и физико-климатических факторов, проявляющих себя как движущие силы изменений в материале и конструкции.

Процессы изменений в состоянии, структуре и свойствах материала развиваются во времени под воздействием внешних и внутренних движущих сил. Внешние движущие силы обусловлены наличием неравновесия материала с окружающей средой, а их значения определяются параметрами операционной среды. Процессы изменений, вызванные внешними воздействиями, могут продолжаться до наступления квазиравновесного состояния «материал-среда» с периодическим повторением (циклическостью) при смене условий среды, приводящей к нарушению этого равновесия.

Технологические и операционные циклы выделены в концепции и методологии структурной материаловедения и технологии в категории «жизненный цикл материала и конструкций», включающий их производство и применение. Вариация параметров процессов формирования структуры в технологическом цикле принята как средство контроля над свойствами получаемых изделий. Эффект *среды* факторов на материал, работающий в строительной конструкции в операционном цикле, анализируется через изменение его состава, структуры и состояния. Именно в этом отношении управление качеством материала исходит из рассмотрения его состава, структуры и свойств *как на момент изготовления* и *«развернутых во времени»*. Последнее как раз и составляет существо и содержание проблемы реализации конструкционного потенциала структуры при эксплуатации.

Таблица 3
Table 3

Движущие силы и процессы, определяющие формирование напряженно-деформированного состояния материала в конструкциях*
Driving Forces and Processes Determining the Formation of Stress-Strain State of the Material in Structures*

Периоды технологического и эксплуатационного циклов Periods of technological and operational cycles		Технологический цикл Technological cycle			Эксплуатационный цикл Operational cycle	
		Твердение материала в опалубке Material hardening in formwork	Распалубка Formwork removal	Набор марочной прочности Gain in "grade" strength	Загрузка Loading	Работа под нагрузкой Operation under load
Тип системы «материал – среда» Type of "material-environment" system		Закрытая Closed			Открытая Open	
Движущие силы изменения состояния материала Driving forces of change in material condition	Внутренние Internal	Неравновесное термодинамическое состояние системы твердения Non-equilibrium thermodynamic state of hardening system				
	Внешние External	Неравновесное со средой тепловое состояние материала Thermal state of material non-equilibrium with environment				
		-			Неравновесное со средой вещественное состояние материала Real state of material non-equilibrium with environment	
		-			Неравновесное напряженное состояние материала от воздействия механической нагрузки Non-equilibrium stress state of material as a result of mechanical load	
Процессы изменения состояния материала Processes of change in material state	От внутренних движущих сил Due internal driving forces	Гидратация и твердение Hydration and hardening				
		Тепловыделение Heat emission				
	От внешних движущих сил Due external driving forces	Теплообмен со средой (нагревание-охлаждение) Heat exchange with environment (heating-cooling)				
		-			Массообмен со средой (высыхание, увлажнение-высушивание) Mass exchange with environment (drying-out, damping-drying)	
		-			Химическая коррозия Chemical corrosion	
		-			Сжатие-растяжение Compression-tension	
Состояние материала в строительной конструкции Condition of material in building structure	Градиентное по степени гидратации и твердения Gradient according to hydration and hardening degree					
	Градиентное по температуре Gradient according to temperature					
	-			Градиентное по влажности Gradient according to humidity		
	-			Градиентное по степени химической коррозии Gradient according to chemical corrosion degree		
	Градиентное по уровню напряжений Gradient according to stress level					
Составляющие напряжений и деформаций в материале Components of stresses and deformations in material	От развития процессов структурообразования и твердения Due to development of processes of structure formation and hardening					
	Температурные Temperature					
	-			Влажностные Humidity		
	-			От химической коррозии Due to chemical corrosion		
	-			От действия механической нагрузки Due to mechanical load effect		
-			Мгновенные Momentary	Длительные Long-duration		
*Рассматривается вариант монолитного исполнения конструкций, когда эксплуатационная среда оказывает влияние на формирование напряженно-деформированного состояния в технологическом и эксплуатационном циклах. *A variant of monolithic execution of structures, when the operational environment influences on the formation of the stress-strain state in technological and operational cycles, is considered.						

композитов опираются на концепции и основания физико-химической механики проявления свойств [13] в конструкциях в эксплуатационном цикле. Полагается, что при повышении или понижении температуры материала напряженно-деформированное состояние структуры зависит от меры активации термофлуктуационных актов разрыва межатомных связей сформированной твердой фазы материала. При изменении содержания и соотношения различных видов воды в структуре (табл. 4) напряженно-деформированное состояние материала зависит от складывающегося баланса сил капиллярности, поверхностного натяжения, когезионного и адгезионного взаимодействия в контактах дисперсных частиц твердой фазы, сил внутренних связей в кристаллах новообразований цементного камня, сил упругого противодействия твердой фазы ее деформированию на фоне одновременного протекания в ней релаксационных процессов.

Мера всех этих сил зависит от состава и структуры материала, а проявление их действия – как от степени водонасыщения или обезвоживания материала, так и от видов воды, участвующих в этих процессах. В рамках представлений о механизме влияния видов воды в структуре бетонов принимается, что химическая, физико-химическая и физико-механическая формы связи воды реализуются по масштабным уровням строения бетонов в характерных и различающихся для них величинах энергии взаимодействия видов связи воды со структурой – капиллярной, адсорбционной, межслоевой молекулярной и гидроксильной в кристаллической решетке новообразований цементного камня.

problem of implementing the structural potential of structures during operation.

Changes in the material with time under the influence of operational factors connected with accumulation of constructive and destructive transformations are understood in the form of processes described by probabilistic-statistic methods, and a valid measure of property changes is introduced with due regard for the possibility of non-failure operation of building structures that is based on the provisions of their limit states.

The function of material wear during the operational cycle is adopted in the form

$$R_b(\tau) = R_{b_0} \cdot e^{-\theta\tau}, \quad (1)$$

where R_{b_0} – is an initial level of the material quality achieved during the technological cycle; θ – coefficient of wear intensity of the material during the operational cycle; τ – duration of action of wear factors during the operational cycle.

The coefficient of wear intensity of the material θ is determined by its composition, structure C and the measure of non-equilibrium of the energetic state connected with K_{cpmc} :

$$\theta = f(C, K_{cpmc}), \quad (2)$$

where C is a structure, K_{cpmc} – coefficient (criterion) of the completeness of processes of material structure formation during the technological cycle.

In this formulation, the criterion K_{cpmc} becomes a measure of possible changes in the structural potential of concrete structures during the time.

Таблица 4
Table 4

Силы и энергия связи воды со структурой материала
Forces and Energy of Water Relationship with Structure of Material

Уровни структуры Levels of structure	Анализируемая система Analyzed system	Вид воды Type of water		Составляющие баланса сил связи твердой фазы и пор с водой Components of force balance of relationship of solid phase and pores with water	Энергия связи воды со структурой, кДж/моль Energy of water relationship with structure, kJ/mole
МАКРО MACRO	Бетон Concrete	Свободная вода Free water		Силы смачивания Wetting forces	<0,05
МЕЗО MESO	Микробетон Micro-concrete	Капиллярно-насыщенная вода Capillary-saturated water		Капиллярные силы, силы поверхностного натяжения Capillary forces, surface tension forces	0,05–0,5
МИКРО MICRO	Цементирующее вещество Cementing substance	Капиллярно-конденсированная вода Capillary-condensated water		Капиллярные силы, расклинивающее давление адсорбционных пленок, силы межмолекулярного взаимодействия поверхности твердой фазы с водой Capillary forces wedging the pressure of adsorption films, forces of intermolecular interaction of solid phase surface with water	0,5–40
		Адсорбционная вода Adsorption water	монослоя ($l=1-2,5$ нм) monolayer ($l=1-2,5$ нм)		40–80
СУБМИКРО SUBMICRO	Новообразования цементирующего вещества New growths of cementing substance		полислоев ($l=2,5-8$ нм) multilayer ($l=2,5-8$ нм)		≈40
НАНО NANO	Кристалл, субмикрорекристалл, частица аморфной фазы новообразований Crystal, sub-, micro-crystal, particle of amorphous phase of new growths	Вода межслоевая молекулярная Interlayer, molecular water		Силы межмолекулярного взаимодействия плоскостей кристаллов с молекулами воды; силы ионной связи OH^- -групп в кристаллической решетке Forces of intermolecular interaction of crystals planes with water molecules; forces of ionic linkage of OH^- -group in crystal lattice	20–80
		Вода кристаллической решетки в виде OH^- -групп Water of crystal lattice in the form of OH^- -group			400–600

Сила и энергия связи видов воды существенно и закономерно убывают от макро- к микро- и наноуровням (табл. 4).

Считается, что определяющий вклад в изменение свойств материала в различном температурно-влажностном состоянии вносят структурные составляющие микро-, субмикро- и наноуровней, что особенно необходимо учитывать для высокотехнологичных бетонов. Обоснованное изменение и регулирование содержания и соотношения этих структурных составляющих являются средством управления балансом сил в структуре и, как следствие, мерой реализации конструкционного потенциала бетона в разновариантных состояниях в эксплуатационном цикле.

Модели температурно-влажностных состояний материала в конструкции

Моделирование эксплуатационных состояний материала в конструкциях является неперенным условием для рассмотрения закономерностей реализации конструкционного потенциала структуры высокотехнологичных бетонов в рамках их реакции на эти состояния. Такое моделирование предполагает учет характеристик диапазона физико-климатических воздействий, суточной и сезонной цикличности параметров среды, особенностей формирования температурно-влажностной градиентности материала в сечениях конструкции и др.

Обобщенно для возможного диапазона параметров эксплуатационной среды можно предложить следующие варианты моделей температурно-влажностного состояния материала в конструкциях:

- **максимально обезвоженное** в воздушной среде (характерно для эксплуатационных сред с повышенной температурой и пониженной влажностью);
- **максимально увлажненное** в воздушной среде (характерно для среды с повышенной влажностью воздуха);
- **максимально нагретое** в воздушной среде (может иметь место при прямой длительной солнечной экспозиции);
- **максимально охлажденное** в воздушной среде (может иметь место при минимальной солнечной экспозиции);
- **максимально водонасыщенное** (может наблюдаться при постоянной эксплуатации бетона в водной среде);
- **замороженное** в сухом и водонасыщенном состоянии (может наблюдаться при длительном действии отрицательных температур эксплуатационной среды);
- **циклически увлажненное-обезвоженное** в воздушной среде (может иметь место в условиях суточной цикличности параметров температуры и влажности среды);
- **циклически замороженное-оттаившее** в воздушной среде (может наблюдаться в условиях суточной цикличности параметров температуры среды).

Эти модели состояний могут быть соотнесены с определенными климатическими зонами, например арктическими, субарктическими, зонами пустынь и полупустынь и т. п., и соответствующими им обычными и экстремальными воздействиями на бетоны. Для возможных климатических вариантов диапазон температурных параметров эксплуатационной воздушной среды отвечает значениям от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$, а влажностных – от 15–20 до 100%; число температурных переходов через 0°C в суточном цикле может составлять несколько десятков; увлажнение поверхностных слоев бетона в конструкциях прямыми осадками может достигать предельных значений водонасыщения.

В указанном диапазоне эксплуатационных воздействий и будут складываться те или иные модели состояний и протекать процессы реализации конструкцион-

The triad “material-structure-environment” is considered in the modern materials science as a condition of the integration of interests of “designers of designs” and “designers of materials structures”. At that, the material science and technology of building composites relies on the concepts and bases of *the physical-chemical mechanics of display of properties [13] in the structures during the operational cycle*.

It is believed that in the course of raising or lowering the material temperature, the stress-strain state of the structure depends on the level of activation of thermo-fluctuation acts of the rupture of interatomic bonds of the formed solid phase of the material. When the content and ratio of different types of water change in the structure (Table 4), the stress-strain state of the material is considered as depending on the forming force balance of capillarity, surface tension, cohesion and adhesion interaction in the contacts of disperse particles of the solid phase, forces of internal ties in crystals of new growths of the cement stone, forces of the elastic resistance of the solid phase to its deformation on the background of simultaneous passing of relaxation processes in it.

The measure of all these forces depends on the composition and structure of the material, and the manifestation of their actions depends both on the degree of water saturation or dewatering of the material and the types of water participating in these processes. Within the framework of ideas about the mechanism of influence of water types in the structure of concretes, it is accepted that chemical, physical-chemical, and physical-mechanical forms of the water relationship are realized, according to the scale levels of concrete structures, in characteristic and distinctive for them values of the energy of interaction of water relationship types with the structure – capillary, adsorption, molecular interlayer and hydroxyl – in the crystalline lattice of new growths of the cement stone. The power and energy of the connection of water types significantly and naturally increase from macro- to micro- and nano-levels (see Table 4).

It is considered that structural components of micro-, submicro- and nano-levels make a decisive contribution to changing properties of the material being in different temperature-humidity conditions, this should be taken into account for high performans concretes. A substantiated change and regulation of the content and the ratio of these structural components is a means of control over the force balance in the structure and, as a consequence, a measure for realizing the structural potential of concrete under multi-variant conditions during the operational cycle.

About models of temperature-humidity conditions of material in structure

The simulation of operational conditions of the material in structures is an indispensable condition for considering regularities of the implementation of structural potential of high performans concrete structures within the frame of their reaction to these conditions. This simulation assumes the account of characteristics of the range of physical-climatic impacts, daily and seasonal cyclicity of environmental parameters, features of the formation of the temperature-humidity gradient-mode of the material in structures sections et. al. Generally, for the possible range of parameters of the operational environment, the following options of models of temperature-humidity conditions of the material in structures can be offered:

- **maximal dewatered** in air environment (characteristic for operational environments with high temperatures and low humidity);
- **maximal moistened** in air environment (characteristic for environment with high humidity of the air);
- **maximal heated** in air environment (may take place at direct prolonged sun exposure);
- **maximal cooled** in air environment (may take place at minimal sun exposure);

ного потенциала высокотехнологичных бетонов. Поэтому для этих моделей важно прогнозировать закономерности развития процессов изменений в структурах высокотехнологичных бетонов и выявлять критериальные структурные факторы динамики процессов и их последствий.

К примеру, в области высоких положительных температур и низких значений влажности воздуха (модель климатических зон полупустынь и пустынь) особенности структур высокотехнологичных бетонов и их состояний могут предопределять самые негативные последствия для долговечности конструкций из-за повышенной удельной влажностной усадки структуры. Именно величина влажностной усадки в расчете на процент удаленного вида влаги из поровой структуры бетона окажется критериальным фактором изменения его конструкционного потенциала.

В области экстремальной отрицательной температуры (модель климатических арктических и субарктических зон) специфика структуры высокотехнологичных бетонов не исключает картину несвойственных для традиционных бетонов негативных эффектов при образовании криофазы и дилатометрических проявлениях. В данном случае критериальным фактором может являться зависимость температуры образования криофазы в структуре бетона от характеристик его пористости, в первую очередь от распределения пор по размерам.

В области циклической смены температурно-влажностных параметров эксплуатационной среды (модель резко континентальных, морских и приморских климатических зон и т. п.) критическим может оказаться (ввиду многократности смены состояний структуры) влияние фактора макро- и микроградиентности напряжений и деформаций поверхностных слоев конструкций, и как следствие этого, включение в работу процессов морозной деструкции и термического послонного разрушения.

Во всех этих и других вариантах, определяемых тенденцией растущей востребованности по применению современных бетонов не только в обычных, но и в экстремальных условиях, определяющим оказывается значение их структуры для «развернутых во времени» (в эксплуатационном цикле) конструктивных свойств — предела прочности, предела трещинообразования, критического коэффициента интенсивности напряжений (вязкости разрушения), трещиностойкости, влажностной усадки и набухания, циклической стойкости при увлажнении — высыхании, при замораживании — оттаивании и др.

Реализации конструкционного потенциала структуры высокотехнологичных бетонов в диапазоне эксплуатационных температурно-влажностных состояний

Мера реализации конструктивных свойств бетона в эксплуатационном цикле полагается, как отмечалось ранее, зависящей от вклада составляющих баланса сил в его напряженно-деформированное состояние при изменении температуры и влажности материала. Такой вклад предопределяется размерно-геометрическими и энергетическими характеристиками твердой фазы и порового пространства с учетом входящих в структуру материала жидкой и газовой фаз, образующих с ними системное единство.

Закономерности реализации конструкционного потенциала бетона и механизмы этого нуждаются в специальном рассмотрении, которое должно касаться и индивидуального и совместного влияния температурного и влажностного факторов в диапазоне их значений и сочетаний в эксплуатационном цикле (в соответствии с предложенными моделями состояний).

- *maximal water saturated* (can be observed at permanent operation of concrete in water environment);
- *frozen* in dry and water saturated state (can be observed under the prolonged effect of negative temperatures of the operational environment);
- *cyclically watered-dewatered* in air environment (may take place under conditions of daily cyclicity of parameters of environmental temperature and humidity);
- *cyclically frozen-thawed* in air environment (can be observed under conditions of the daily cyclicity of parameters of environmental temperature).

These models of states can be correlated with certain climatic zones (arctic, subarctic, desert and semi-desert etc.) and conventional and extreme impacts on concretes corresponding to them. For possible climatic variants the range of temperature parameters of operating air environment can meet the values from -60°C up to $+60^{\circ}\text{C}$ and for humidity — from 15–20% up to 100%; the number of temperature transition via 0°C during the daily cycle can be several tens; moistening of surface coats of concrete in structures with direct precipitation can reach maximum values of water saturation.

Within this range of operational impacts, certain state models will be formed and processes of the realization of the structural potential of high performans concretes will proceed. Therefore for these models it is important to predict regularities of development of changing processes in the structures of high performans concretes and reveal criterion structural factors of the processes dynamic and their consequences.

For example, in the area of high positive temperatures and low values of air humidity (a model of desert and semi-desert climatic zones), the features of high performans concrete structures and their states can predetermine the most negative sequences for structures durability due to the high specific humidity shrinkage. The value of humidity shrinkage in the calculation of the percentage of moisture removed from the porous structure of concrete will become the criterion factor of the change in its structural potential.

In the area of extreme negative temperatures (model of arctic and subarctic climatic zones), the specificity of high performans concrete structure does not exclude the picture of unusual for traditional concretes negative factors at the formation of a cryo-phase and dilatometric manifestations. In this case, the criterion factor is the dependence of the temperature of cryo-phase in the concrete structure on the characteristic of its porosity, in the first place, on the distribution of pores according to sizes.

In the areas of the cyclic changes in temperature-humidity operational environment (model of sharply continental, marine and seaside climatic zones etc.), the influence of the factor of micro- and macro-gradient stresses and strains of surface layers of structures can be critical and, as a result, initiation of processes of frost destruction and thermal layer-by-layer destruction.

In all these and other variants determined by the tendency of growing demand for using modern concretes under not only normal, but extreme conditions also, the determinative moment is the importance of their structures for “deployed in time” (during the operational cycle) structural properties: strength limit, crack formation limit, critical coefficient of stresses intensity (fracture viscosity), crack resistance, humidity shrinkage and swelling, cyclic resistance to watering-drying, freezing-thawing etc.

About realization of structural potential of high performans concrete structures within the range of their operational temperature-humidity states

Measure of implementing structural properties of concrete during the operational cycle, as it was noted earlier, depends on the contribution of components of the force balance to its stress-strain state when the temperature and moisture content of the material are changing. Such a contribu-

Влияние изменений температуры бетона на его прочность рассматривается, как уже указывалось, в рамках термофлуктуационной теории разрушения твердых тел. Считается, что в эксплуатационном температурном диапазоне от -60 до $+60^{\circ}\text{C}$ изменение энергии активации для связей MeO и SiO , характерных для цементных и силикатных систем твердения, незначительно. В наших исследованиях установлено, что изменение прочности в сухом состоянии для плотных и макропористых структур бетонов не превышает 10% во всем рассматриваемом температурном диапазоне.

Значение рассматриваемого эксплуатационного фактора на конструкционный потенциал необходимо анализировать, имея в виду величины температурных деформаций материала и их градиент в рабочих сечениях конструкций. С учетом модуля упругости высокотехнологичных бетонов температурные напряжения (для условий стесненности деформирования конструкций и градиентности температурного деформирования бетона в рабочих сечениях) показатели напряженно-деформированного состояния могут существенно отличаться по сравнению с традиционными структурами бетонов. Можно считать, что в моделях максимально нагретого или максимально охлажденного массива конструкций, находящихся в макроградиентном напряженном состоянии, более вероятны ситуации деструкции (трещинообразования).

Влияние изменения влажностного состояния на потенциал сопротивления бетонов разрушению $R(P)$ соотносится с результатом действия, во-первых, кристаллических сил связей в твердой фазе P_{KC} , мера изменения которых ΔP_{KC} в присутствии молекул адсорбционно-активной среды (воды) зависит от ее количества (W_A), и энергии взаимодействия с поверхностью твердой фазы (иначе, от удельной поверхностной энергии $q_{mv,ф}$); во-вторых, от сил капиллярного стяжения $P_{КД}$, проявление которых определяется наличием в объеме порового пространства водных менисков:

$$R(P) = P_{KC} - \Delta P_{KC} + P_{КД}, \quad (3)$$

при том что величина $P_{КД}$ зависит от радиуса пор и степени заполнения пор водой (отношения объема жидкой фазы к объему пор $V_{жф}/V_{пор}$).

Проявление действия этих сил в их балансе зависит от изменения влагосодержания материала и, соответственно, от проявления действия форм связи воды со структурой. Такое проявление в диапазоне от исходного сухого до водонасыщенного состояния (и наоборот) неоднозначно влияет на изменение прочности.

По результатам экспериментальных исследований, проведенных для плотных и макропористых бетонов при широком варьировании параметров их строения, наблюдались и выявлены три типа зависимостей (рис. 1) изменения прочности бетона при увлажнении.

Характер зависимостей определяется изменением вклада адсорбционных и капиллярных сил в потенциал сопротивления бетона разрушению.

Наибольшее снижение прочности обуславливается проявлением действия адсорбционной воды (характерная кривая I типа); при этом фиксируется величина коэффициента размягчения по прочности бетона $K_p = 0,7-0,75$.

Наименьшее снижение прочности (характерная кривая II типа) имеет место, когда расщепляющее гидролитическое действие, расклинивающее давление воды адсорбционных слоев в значительной мере компенсируются силами капиллярного стяжения; в этом варианте влажностного состояния бетона $K_p = 0,85-0,95$.

Рассмотренные типы зависимостей присущи высокопрочным модифицированным бетонам, структура

tion is predetermined by dimensional-geometric and energy characteristics of the solid phase and void space with due regard for liquid and gas phases which are parts of the material structure and form the system unity with them.

Regularities of the realization of the structural potential of the concrete and mechanisms of this are needed for special consideration which should concern both individual and joint impact of temperature and humidity factors within the range of their values and combinations during the operational cycle (in accordance with proposed models of states).

The effect of temperature changes in concrete on its strength is considered, as it is already indicated, within the frames of the thermo-fluctuation theory of failure of solids. It is considered that in the operational temperature range from -60°C to $+60^{\circ}\text{C}$, the change in the activation energy for bonds MeO and SiO , characteristic for cement and silicate systems of hardening, is insignificant. It is established by our studies that the change in dry state for dense and macro-porous structures of concretes does not exceed 10% for the whole temperature range considered.

The importance of impact of the operational factor on the structural potential is necessary to analyze bearing in mind the values of temperature deformations of the material and their gradient in working cross-sections of the structures. With due regard for the elasticity module of high performans concretes, the temperature stresses (for conditions of tightness of structures deformation and gradients of concrete temperature deformation in working cross-sections) and indicators of the stress-strain state may significantly differ in comparison with the traditional structures of concretes. It can be considered that in models of maximum heated and maximum cooled massifs of structures, which are in the macro-gradient stress state, destruction situations (crack formation) are more probable.

The effect of the change in the humidity state on the potential of concrete resistance to fracture $R(P)$ is correlated with the result of actions, firstly, of crystal forces of bonds in the solid phase P_{CB} , measure of which changes ΔP_{CB} in the presence of molecules of the adsorption-active medium (water) depends on its quantity (W_A) and the energy of interaction with the solid phase surface (otherwise, on the specific surface energy q_{sf}), secondly, on forces of capillary contraction P_{CC} , manifestation of which is determined by availability of water meniscuses in the volume of porous space:

$$R(P) = P_{CB} - \Delta P_{CB} + P_{CC}, \quad (3)$$

while: the value P_{CC} depends on the radius of pores and the degree of pore filling with water (relationship of the volume of the liquid phase to the volume of pores V_{lf}/V_p).

The manifestation of these forces in their balance depends on the change in moisture content of the material and, respectively, on the manifestation of action of forms of water connection with the structure. Such manifestation in the range from the initial dry state up to water saturated (and vice versa) ambiguously influences on the change in strength.

According to the results of experimental studies conducted for dense and macro-porous concretes at the wide variation of parameters of their structure, three dependences (Pic. 1) of the change in the concrete strength at damping are observed and revealed.

The character of dependences is determined by the change in the contribution of adsorption and capillary forces to the potential of concrete resistance to deterioration.

The maximum reducing of strength is determined by the manifestation of the adsorption water action (representative curve of I type); at that, the value of the coefficient of softening of concrete strength $K_p = 0,7-0,75$ is fixed.

The minimal reducing of strength (representative curve of II type) takes place, when the splitting hydrolytic action wedging the water pressure of adsorption layers is signifi-

Таблица 5
Table 5

Мера снижения прочности бетонов на различных диапазонах влагосодержания
The Measure of Concrete Strength Reduction at Different Humidity Ranges

Вид бетона Type of concrete	Коэффициент размягчения K_p Softening coefficient K_p						
	В диапазонах влагосодержания, мас. % In humidity ranges			При температуре, °C At temperature, °C			
	1–1,5	2,5–5	>5	-(60–40)	0	+20	+60
Традиционный Traditional	0,95±0,05	0,92±0,05	0,90±0,05	1,23±0,05	1,0±0,05	0,94±0,05	0,97±0,05
Высокотехнологичный High performans	0,88±0,05	0,82±0,05	0,70±0,05	0,98±0,05	0,84±0,05	0,75±0,05	0,75±0,05

которых отличается развитой поверхностью раздела межзеренных и межфазных границ и преобладанием в структуре наноразмерных пор.

Кривая III типа отличается пониженной выраженностью эффектов действия адсорбционных и капиллярных сил, в результате чего величина $K_p \approx 0,9$. Зависимости прочности от влажности данного типа характерны для плотных и макропористых бетонов с традиционной (немодифицированной) структурой микробетона.

Влияние влажностного фактора может происходить в условиях меняющейся температуры. Для влажного материала повышение его температуры усиливает эффект понижения прочности. Это происходит вследствие снижения вязкости воды и облегчения условий смачивания поверхности твердой фазы; вода быстро проникает к поверхности разрушения именно в момент образования трещин.

cantly compensated by forces of capillary contraction; in this variant, humidity conditions of concrete $K_p = 0.85–0.95$.

The types of dependences considered inherent high-strength modified concretes which structure has a developed surface of the partition of intra-grain and intra-phase boundaries and prevails in the structure of nano-size pores.

The curve of III type is characterized by reduced manifestation of effects of the action of adsorption and capillary forces, as a result the value $K_p \approx 0.9$. The strength dependences on the humidity of this type are characteristic for dense and macro-porous concretes with traditional (non-modified) structure of micro-concrete.

The impact of the humidity factor can take place under conditions of changing temperature. For wet material the increase in its temperature intensifies the effect of strength reduction. This takes place due to the reduction in water viscosity and facilitating the wetting of the solid phase surface;

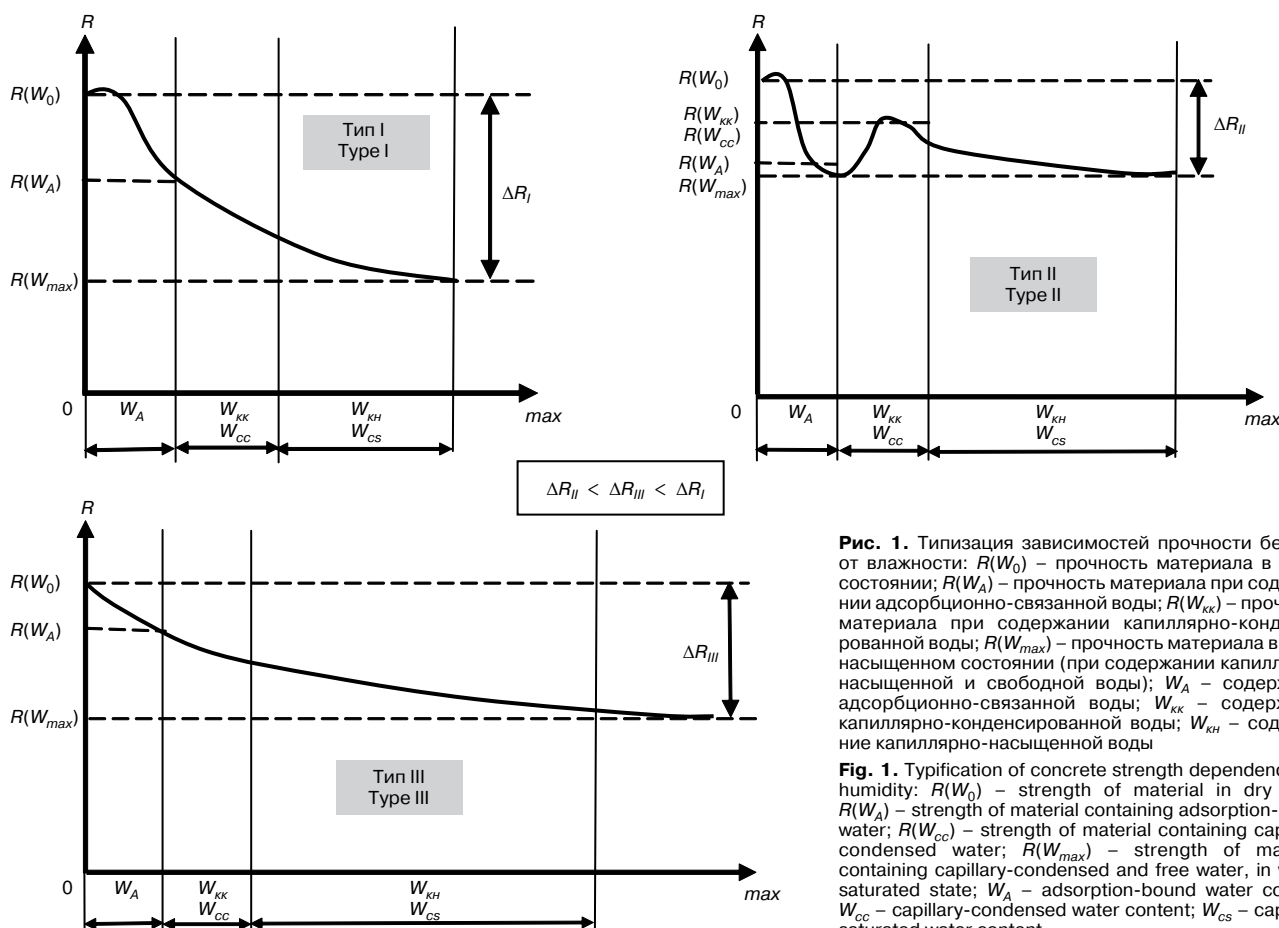


Рис. 1. Типизация зависимостей прочности бетонов от влажности: $R(W_0)$ – прочность материала в сухом состоянии; $R(W_A)$ – прочность материала при содержании адсорбционно-связанной воды; $R(W_{кк})$ – прочность материала при содержании капиллярно-конденсированной воды; $R(W_{max})$ – прочность материала в водонасыщенном состоянии (при содержании капиллярно-насыщенной и свободной воды); W_A – содержание адсорбционно-связанной воды; $W_{кк}$ – содержание капиллярно-конденсированной воды; $W_{кн}$ – содержание капиллярно-насыщенной воды

Fig. 1. Typification of concrete strength dependences on humidity: $R(W_0)$ – strength of material in dry state; $R(W_A)$ – strength of material containing adsorption-bound water; $R(W_{cc})$ – strength of material containing capillary-condensed water; $R(W_{max})$ – strength of material, containing capillary-condensed and free water, in water-saturated state; W_A – adsorption-bound water content; W_{cc} – capillary-condensed water content; W_{cs} – capillary-saturated water content

Для высокотехнологичных бетонов во влажном их состоянии влияние воды всех форм связи настолько значительно, что коэффициент размягчения оказывается существеннее, чем для традиционных бетонов. При этом величина K_p имеет значение меньше единицы не только при положительной, но и при отрицательной температуре (табл. 5).

Влияние температурно-влажностного состояния бетона на его конструкционный потенциал требуется анализировать, имея в виду зависимость величин коэффициентов линейного температурного расширения и влажностных деформаций от структуры материала. Для влажностных деформаций в зависимости от сформированной структуры бетона, обоснованно ввести [15] модели его деформирования при обезвоживании или типы кривых влажностной усадки (рис. 2).

Тип I кривых усадки присущ материалам со структурой, отличающейся повышенными величинами дисперсности частиц твердой фазы, суммарной площади их поверхности и запаса избыточной поверхностной энергии и одновременно с этим минимальными значениями размера пор. Именно это определяет максимальные значения величины усадки на всех этапах обезвоживания. Тип III свойствен материалу со структурой, характеристики составляющих твердой фазы которой отличаются относительно большей мерой закристаллизованности, а запас избыточной поверхностной энергии структуры оказывается минимальным. Тип II характерен для материалов с промежуточными значениями характеристик структуры.

Существо управления показателями влажностной усадки материала заключено в возможностях изменения характера и силы связи его твердой фазы и порового пространства с водой посредством уменьшения относительного содержания в материале объема цементирующего вещества и пор, увеличения закристаллизованности новообразований с пониженной удельной площадью поверхности и удельной поверхностной активностью, увеличения среднего эффективного радиуса пор.

water quickly penetrates to the fracture surface exactly at the moment of crack formation.

For high performans concretes in their wet state, the influence of water of all connection forms is so significant that the softening coefficient is more substantial than for traditional concretes. At that, the value K_p is less than one not only at positive temperatures but also at negative ones (Table 5).

The impact of temperature-humidity conditions of the concrete on its structural potential is needed to be analyzed, keeping in mind the dependence of values of coefficients of linear temperature expansion and humidity deformations on the structure of material. For humidity deformations, depending on the formed structure of concrete, it is reasonable to introduce [15] the models of its deformation in case of dewatering or types of the curves of humidity shrinkage (Pic. 2)

Type I of shrinkage curves is inherent to materials with the structure notable for increased values of dispersion of solid phase particles, total area of their surface and reserve of the excess surface energy and, simultaneously, minimal values of pore sizes. This determines maximal values of the shrinkage at all the stages of dewatering. Type III is inherent to the material, characteristics of components of the solid phase of which are notable for the relatively larger measure of crystallineness, and the reserve of excess surface energy of the structure is minimal.

Type II is typical for materials with intermediate values of structure characteristics.

The essence of control over indicators of moist shrinkage is a possibility to change the character and bonding forces of its solid phase and porous space with water by means of reducing the relative content of the cementing substance volume and pores in the material, increasing the crystallineness of new formations with reduced specific surface area and specific surface activity, increasing the average efficient radius of pores. This directed modification of the composition and structure of the material is characterized by the change of the deformation model and, accordingly, possibility to cardinally reduce (by half order-order) the values of its specific and complete shrinkage (Table 6).

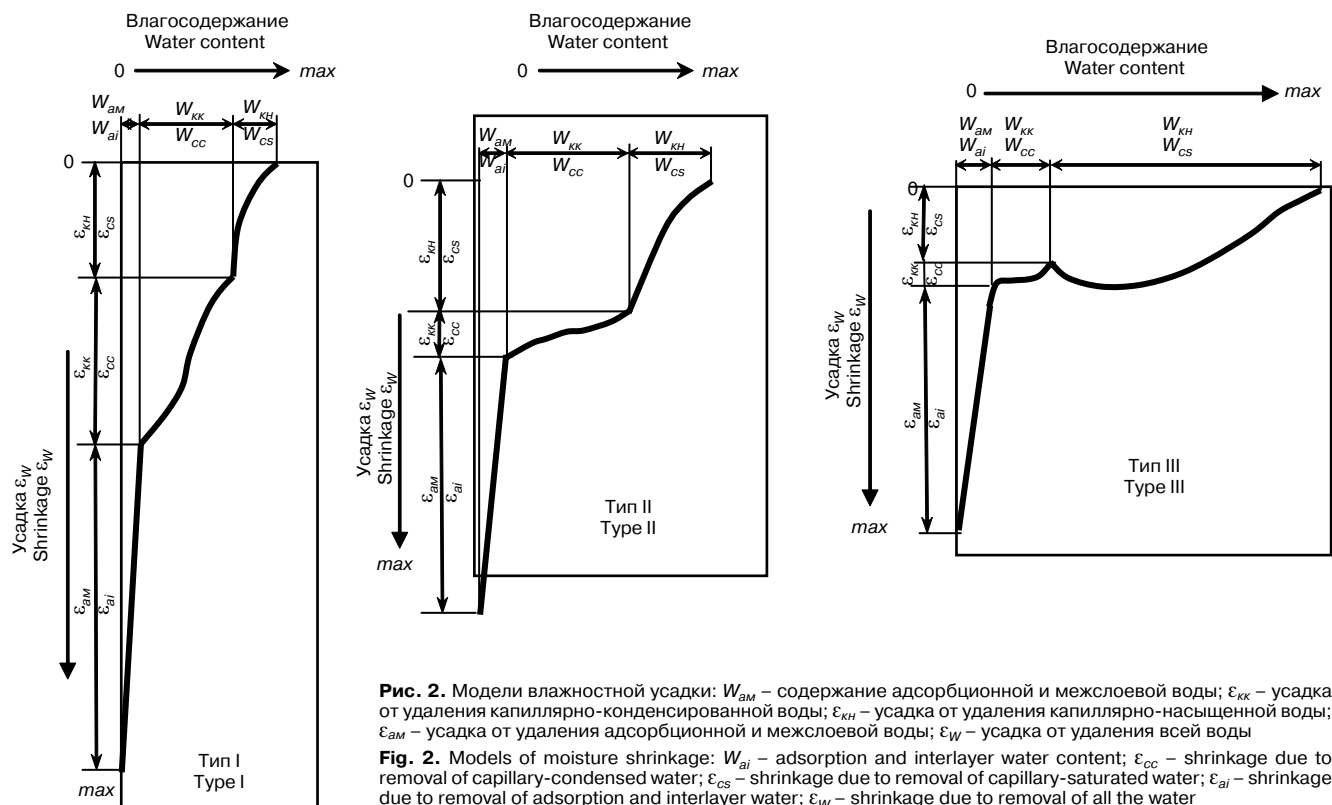


Таблица 6
Table 6

Величина усадки цементных бетонов на различных стадиях увлажнения-обезвоживания
Value of shrinkage of cement concretes at different stages of watering and dewatering

Модель усадки Shrinkage model	Величина усадки в мм/м при удалении различных видов воды Value of shrinkage in mm/m at removal of different type of water		
	Всей массы воды Whole mass of water	Капиллярно-связанной Capillary-bound	Адсорбционной и межслоевой Adsorption and inter-layer
I	$\frac{2,31}{0,085}$	$\frac{1,38}{0,053}$	$\frac{0,93}{0,77}$
II	$\frac{1,55}{0,031}$	$\frac{0,6}{0,013}$	$\frac{0,95}{0,22}$
III	$\frac{1,6}{0,021}$	$\frac{0,53}{0,007}$	$\frac{1,07}{0,22}$

Примечание. Над чертой – полная, под чертой – удельная усадка.
Note. Above the line – complete, below the line – specific shrinkage.

Такое направленное модифицирование состава и структуры материала характеризуется изменением модели деформирования и соответственно возможностью кардинального (на полпорядка-порядок) снижения величины удельной и полной его усадки (табл. 6).

Уместно здесь привести данные, полученные по результатам оценки деформаций автоклавного микробетона в гигростатах с различной величиной парциального давления водяного пара. Такая методика испытаний позволила получить данные по удельной усадке от удаления свободной, капиллярно-насыщенной, капиллярно-конденсированной, адсорбционной и межслоевой воды. Показано, что величины удельной усадки материала от удаления капиллярно-насыщенной и капиллярно-конденсированной воды сопоставимы, однако в пределах одного вида воды, взаимодействующей с материалом, в зависимости от его состава и структуры показатели могут отличаться почти на порядок. Воздействие адсорбционной и межслоевой воды на усадку по удельной ее величине на один-два порядка сильнее, чем капиллярно-насыщенной и капиллярно-конденсированной [15].

Анализ и систематизация механизмов накопления повреждений в материале от морозного разрушения [1–6] дают основания к выделению двух главных факторов управления морозостойкостью бетонов [16]:

1. Фактор температуры заморозания воды в поровой структуре.
2. Фактор массопроводности материала в термоградиентных условиях его эксплуатации в конструкции.

Первый фактор является критериальным для развития деформаций и напряжений вследствие процессов льдообразования; второй фактор предопределяет возможность и интенсивность накопления влаги в охлаждаемых зонах вследствие ее миграции из теплых зон.

Проявление действия этих факторов зависит от силы связи воды со структурой материала, и поэтому обеспечение морозостойкости бетона связывается со следующей системой его структурных характеристик: объемом пор и их размерами, удельной поверхностной энергией твердой фазы и мерой ее смачиваемости водой. Условие повышения морозостойкости, разумеется, соотносится с наличием резервного, не заполненного жидкой фазой объема пористости в материале, в который она может отжиматься при льдообразовании в заполненных водой порах.

Действие рассмотренных факторов неоднозначно и диалектично влияет на морозостойкость бетонов.

Одним из возможных направлений влияния на морозную деструкцию и повышение морозостойкости строительных материалов считается прием формирования микропористых их структур. Здесь критериальным для развития морозного разрушения является фактор возможности перехода жидкой фазы в криофазу (температуру заморозания воды в материале), которая зависит от силы связи воды со структурой материала. В зависимости от структуры материала значение температуры заморозания воды в нем может находиться в интервале от 0 до -70°C, а мера деформирования материала при замораживании (рис. 3, а, б), являющаяся следствием и «тестом» возможного проявления кристаллизационного давления при льдообразовании, может отличаться на два порядка при изменении среднего эквивалентного радиуса пор от 10 до 70 нм.

It is appropriate to present the data obtained as a result of the assessment of autoclaved micro-concrete deformations in the hydrostats with different values of partial pressure of water steam. This methodology of testing makes it possible to obtain the data on the specific shrinkage after removing free, capillary-saturated, capillary-condensed, adsorption and interlayer water. It is shown that the value of the material specific shrinkage after removing capillary-saturated and capillary-condensed water are comparable, but within the limits of one type of water interacting with the material, depending on its composition and structure the indicators may differ by an order of magnitude. The effect of adsorption and interlayer water on the shrinkage according to its specific value is stronger by one-two orders of magnitude than capillary-saturated and capillary-condensed [15].

The analysis and systematization of mechanisms of damage accumulation in the material from the frost fracturing [1–6] give basis to allocate two basic factors of control over frost-resistance of concretes [16]:

1. Factor of water freezing temperature in the porous structure.
2. Factor of mass conductivity of the material under thermogradient conditions of its operation in the construction.

The first factor is criterial for development of deformations and stresses due to the process of ice formation; the second factor predetermines the possibility and intensity of moisture accumulation in cooled zones due to its migration from warm zones.

The manifestation of these factors action depends on the coupling strength of the water with the material structure and therefore the achievement of concrete frost resistance is associated with the following system of its structural characteristics: volume and sizes of pores, specific surface energy of the solid phase and the measure of its water wetting. A condition of increasing the frost-resistance, of course, is correlated with the presence of reserve, not filled with the liquid phase, volume of porosity in the material, in which it can be squeezed in the course of ice formation in pores filled with water.

The effect of the factors considered is ambiguous and dialectically effects on frost resistance of concrete.

One of possible ways of the influence on the frost destruction and increase in frost-resistance of building materials is a method for forming their micro-porous structures. Here, the factor of possibility of transition of the liquid phase to cryophase (temperature of water freezing in the material), which depends on the coupling strength of water with the structure of material, is criterial for development of frost destruction. Depending on the structure of material, the value of water freezing temperature can be within the limits from 0°C to

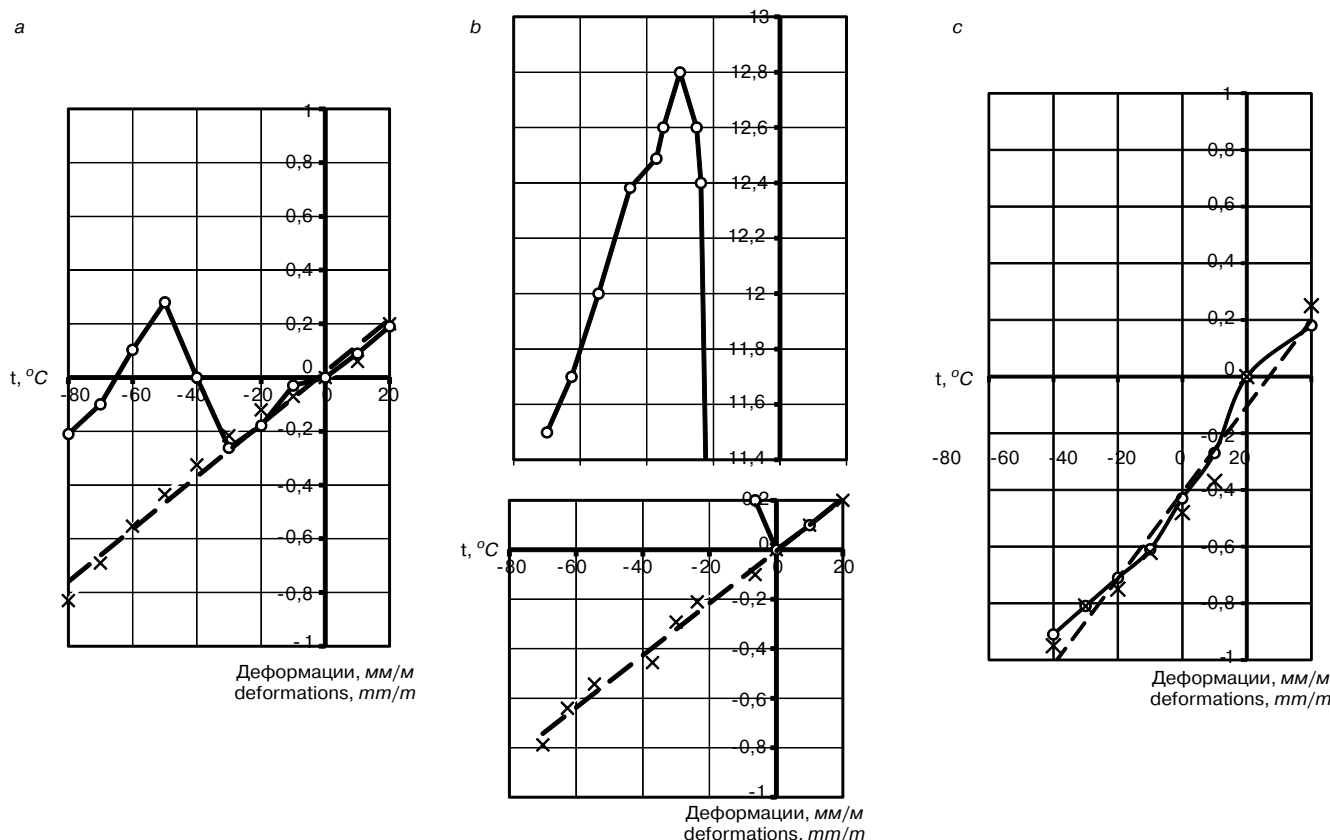


Рис. 3. Дилатометрические эффекты при замораживании сухих и водонасыщенных бетонов: -x- – сухие образцы; -o- – водонасыщенные образцы; а – немодифицированный микробетон $r_{экв} = 25$ нм; б – немодифицированный микробетон $r_{экв} = 70$ нм; с – модифицированный микробетон $r_{экв} = 5$ нм

Fig. 3. Dilatometric effects during freezing of dry and water-saturated concretes: -x- – dry samples; -o- – water-saturated samples; а – unmodified micro-concrete $R_{equiv.} = 25$ nm; б – unmodified micro-concrete $R_{equiv.} = 70$ nm; с – modified micro-concrete $R_{equiv.} = 5$ nm

Высокий потенциал морозостойкости бетонов нового поколения [17], создаваемых на основе системного модифицирования их структур, в том числе и на нано-уровне, предопределяется следующими условиями. В структуре цементирующего вещества данных бетонов поровое пространство характеризуется преобладанием пор с размером 1–5 нм. Образования криофазы в них в эксплуатационном диапазоне температуры вообще не происходит (рис. 3, с). Это объясняется тем, что действие сил кристаллизации для перехода «структуры воды» в «структуру льда» оказывается недостаточным для соответствующей переориентации молекул воды в объеме пор и на границе с твердой фазой, поскольку вода находится в поле действия сил энергонасыщенного объема порового пространства.

Выводы

1. Реализация конструкционного потенциала структуры высокотехнологичных бетонов в диапазоне эксплуатационных температурно-влажностных их состояний определяется характером и силой связи твердой фазы и порового пространства с водой.

2. Рассмотрение механико-физико-химической природы и закономерностей взаимосвязи меры изменения свойств бетонов с его температурно-влажностным состоянием позволило обозначить систему структурных характеристик, влияющих на проявление и реализацию конструкционного потенциала материала. В этом смысле управление мерой изменения конструкционного потенциала структурой бетонов в эксплуатационном цикле должно основываться на регулировании баланса сил в соотношении со следующими параметрами строения: $V_{тв.ф.}$, $S_{тв.ф.}$, $q_{тв.ф.}$ – объемом, площадью поверхно-

-70°C, and the measure of material deformation at freezing (Pic. 3, a, b), which is a result and “test” of possible manifestation of crystallization pressure in the course of ice formation, may differ by two orders of magnitude at the change in the average equivalent radius of pores from 10 to 20 nm.

High potential of frost-resistance of concrete of a new generation [17] generated on the basis of systematic modification of their structures, including at the nano-level, is predetermined by the following conditions. In the structure of cementing substance of these concretes, the porous space is characterized by the predominance of pores of 1–5 nm size. The formation of the cryophase in them, within the operational range of temperatures does not take place at all (Pic. 3, c). It is explained by the fact that the effect of crystallization forces for transition of “water structure” to “ice structure” is not enough for the appropriate reorientation of water molecules in the pores volume and at the boundary with the solid phase since the water is in the area of action of forces of energy-saturated volume of the porous space.

Conclusions

1. The implementation of the structural potential of high performans concretes structures in the range of their operational temperature and humidity states is determined by the character and bonding strength of the solid phase and porous space with water.

2. The consideration of mechanical-physical-chemical nature and regularities of interrelation of the measure of concrete properties changing with its temperature-humidity state makes it possible to outline the system of structural characteristics impacting on the manifestation and implementation of the material structural potential. In this respect, the control over the measure of changing the structural potential by

сти и удельной поверхностной энергией твердой фазы; r_{cs} – размером структурных элементов; $V_{пор}$ – объемной долей пор и $dr_{пор}/dV_{пор}$ – распределением их по размерам; θ – краевым углом смачивания жидкостью поверхности твердой фазы.

3. Параметры структуры высокотехнологичных бетонов определяют относительно небольшой диапазон изменения их эксплуатационного влагосодержания – не более 4–5%. Однако повышенная сила связи их структуры с водой при меньшем объеме пор и их радиусе, при повышенной площади поверхности и поверхностной энергии твердой фазы обуславливает в целом возрастание в 1,5–2,5 раза величины удельных влажностных деформаций усадки-набухания на 1% изменения влажности (в сравнении с традиционными плотными бетонами). С другой стороны, особенности структуры высокотехнологичных бетонов препятствуют развитию процессов льдообразования при замораживании водонасыщенного материала в диапазоне температуры 0 – -60°C. Это оказывается предпосылкой и условием их повышенной морозостойкости.

4. Изменение температурно-влажностного состояния высокотехнологичных бетонов в эксплуатационном цикле может сопровождаться более существенным по сравнению с традиционными бетонами, изменением прочности. Более интенсивное развитие влажностных деформаций может сопровождаться высоким уровнем напряжений в конструкциях даже при незначительном изменении эксплуатационного влагосодержания высокотехнологичных бетонов. Для высокопрочных модифицированных бетонов их размягчение при водонасыщении оказывается существенно выше, чем для традиционных бетонов, не только при положительных, но и при отрицательных температурах. Все это необходимо учитывать при определении их расчетных характеристик.

Список литературы

1. Ананян А.А. Особенности воды в промерзающих тонкодисперсных горных породах. *Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах: Сб. науч. тр.* 1972. С. 116–127.
2. Александровский С.В. Александровский В.С. Базовая модель теории промерзания влажных пористых тел // *Бетон и железобетон.* 2005. № 6. С. 20–21.
3. Беркман А.С., Мельникова И.Г. Структура и морозостойкость строительных материалов. М.: Госстройиздат, 1962. 164 с.
4. Горчаков Г.И. Влияние льдообразования в порах бетона на морозостойкость // *Бетон и железобетон.* 1977. № 9. С. 35–37.
5. Добшиц Л.М. Физико-химическая модель разрушения бетонов при попеременном замораживании-оттаивании // *Вестник гражданских инженеров.* 2009. № 3 (20). С. 104–110.
6. Горчаков Г.И. Состав, структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1976. 144 с.
7. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гостехиздат, 1954. 320 с.
8. Богословский В.Н., Гагарин В.Г. Потенциал влажности. Теоретические основы. *Вестник ОЧН РААСН. Вып. 1.* Москва. 1996. С. 12–14.
9. Цимерманис Л.Б. Термодинамические и переносные свойства капиллярно-пористых тел. Челябинск: Южно-Уральское кн. изд., 1970. 202 с.
10. Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // *Строительные материалы.* 2014. № 3. С. 6–14.

the structure of concretes during the operational cycle should be based on regulating the balance of forces in correlation with the following parameters of the composition: V_{sp} , S_{sp} , q_{sp} – volume, area of surface and specific surface energy of the solid phase, r_{se} – sizes of structural elements, V_p – volumetric proportion of pores, and dr_p/dV_p – their distribution according to sizes, θ – interfacial angle of wetting of the solid phase surface with liquid.

3. Parameters of high performans concretes structure predetermine a relatively small range of change in their operational moisture content – not over 4–5%. But increased strength of relationship of their structure with water at less volume of pores and their radius, at increased area of surface and surface energy of the solid phase causes the growth of the value of specific moisture deformations of shrinkage-swelling by 1.5–2 times, change in humidity by 1% (in comparison with traditional dense concretes). From other side, features of the high performans concretes structure prevent the development of ice formation processes at freezing of water-saturated material in he temperature range +0 – -60°C. This is a prerequisite and condition of their improved frost resistance.

4. Changing the temperature-humidity conditions of high performans concretes during the operational cycle can be accompanied by more substantial change in the strength in comparison with traditional concretes. More intensive development of humid deformations may be followed by high level of stresses in structures even at the insignificant change in operational water content of high performans concretes. For high-strength modified concretes their softening at water saturation is significantly higher than for traditional concretes not only at positive temperatures but at negative temperatures also. All this should be taken into account at determining their calculated characteristics.

References

1. Ananyan A.A. Features of water in the freezing-through fine mountain breeds. *Superficial forces in thin films and disperse systems: International Scientific Conference.* 1972, pp. 116–127. (In Russian).
2. Aleksandrovskiy S.V., Aleksandrovskiy V.S. Basic model theory of freezing wet porous bodies. *Beton i zhelezobeton.* 2005. No. 6, pp. 20–21. (In Russian).
3. Berkman A.S., Mel'nikova I.G. *Struktura i morozostoikost' stroitel'nykh materialov* [Structure and frost resistance of building materials] Moscow: Gosstroizdat 1962. 164 p.
4. Gorchakov G.I. Influence of ice formation in a concrete time on frost resistance // *Beton i zhelezobeton.* 1977. No. 9, pp. 35–37. (In Russian).
5. Dobshits L.M. Physico-chemical model of the fracture of concrete under alternate maintenance-thawing. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov.* 2009. No. 3 (20), pp. 104–110. (In Russian).
6. Gorchakov G.I. *Sostav, struktura i svoystva tsementnykh betonov* [The composition, structure and properties of cement concrete]. Moscow: Stroizdat. 1976. 144 p.
7. Lykov, A.V. *Yavleniya perenosa v kapillyarno-poristykh telakh* [The transfer phenomena in capillary and porous bodies]. Moscow: Gostekhizdat. 1954. 320 pp.
8. Bogoslovskiy V.N., Gagarin V.G. Potential humidity. Theoretical basis. *Bulletin RAASN OSN.* 1996. Vol. 1, pp. 12–14. (In Russian).
9. Tsimermanis L.B. *Termo-dinamicheskie i perenosnye svoystva kapillyarno-poristykh tel* [Thermodynamic and figurative properties of capillary and porous bodies]. Chelyabinsk: South Ural Book Publishers. 1970. 202 p.
10. Bazhenov Yu.M., Chernyshov E.M., Korotkikh D.N. Designing of structures of modern concrete: the defining principles and technological platforms. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 3, pp. 6–14. (In Russian).

11. Славчева Г.С. Влияние температурно-влажностного состояния на закономерности изменения показателей сопротивления разрушению бетонов // *Вестник гражданских инженеров*. 2010. № 1 (22). С. 23–28.
12. Славчева Г.С., Чемоданова С.Н. Новое поколение высокопрочных модифицированных бетонов: отличительные признаки структуры и закономерности развития деформаций // *Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура*. 2011. № 2 (22). С. 58–67.
13. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Физико-химическая природа взаимосвязи свойств строительных материалов с их влажностным состоянием // *Academia*. 2008. № 1. С. 87–92.
14. Чернышов Е.М. Формула «4С» (состав, структура, состояние, свойства) в концептуально-методологической парадигме современного строительного материаловедения // *Строительные материалы 4С: состав, структура, состояние, свойства: Междунар. науч. конф.* Новосибирск. 2015. С. 5–12.
15. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Управление эксплуатационной деформируемостью и трещиностойкостью макропористых (ячеистых) бетонов. Ч. 1. Контекст проблемы и вопросы теории // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 105–112.
16. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Морозное разрушение и морозостойкость строительных материалов: современная трактовка механизма и факторов управления // *Вестник отделения строительных наук РААСН. Вып. 9*. Белгород. 2005. С. 447–459.
17. Славчева Г.С., Чернышов Е.М. Влияние структуры высокопрочных модифицированных бетонов на dilatометрические эффекты при их замораживании // *Вестник инженерной школы ДВФУ. Строительные материалы и изделия*. 2015. № 1 (22). С. 63–70.
11. Slavcheva G.S. Influence of a temperature and moist state on regularities of change of indicators of resistance to destruction of concrete. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2010. No. 1 (22), pp. 23–28. (In Russian).
12. Slavcheva G.S., Chemodanova S.N. New generation of the high-performance concrete: distinctive signs of structure and regularity of development of deformations. *Nauchnyi vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2011. No. 2 (22), pp. 58–67. (In Russian).
13. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. Physical and chemical nature of interrelation of properties of construction materials with their moist state. *Academia*. 2008. No. 1, pp. 87–92. (In Russian).
14. Chernyshov E.M. Formula "4C" (structure, structure, a state, properties) in a kontseptual-but-methodological paradigm of modern construction materials science. *Construction materials 4C: structure, structure, state, properties: International Scientific Conference*. Novosibirsk. 2015, pp. 5–12. (In Russian).
15. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. Management of operational deformability and crack resistance of macroporous (cellular) concrete. Part 1. Context of a problem and questions of the theory. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2014. No. 1–2, pp. 105–112. (In Russian).
16. Chernyshov E. M. Slavcheva, G. S. Frost destruction and frost resistance of building materials: a modern interpretation of the mechanism and management factors. *Bulletin of the Department of construction Sciences RAACS*. Belgorod. 2005. Vol. 9, pp. 447–459. (In Russian).
17. Slavcheva G.S., Chernyshov E.M. Influence of structure of high strength modified concrete on dilatometric effects when freezing. *Vestnik inzhenernoi shkoly DVFU. Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2015. No. 1 (22), pp. 63–70. (In Russian).



Международная научно-практическая конференция

ПРОМЫШЛЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ: ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

9–13 ноября 2015 г., Казань, Россия

Конференция проводится под эгидой Федерального агентства по недропользованию и Правительства Республики Татарстан. Конференция посвящена 70-летию ФГУП «ЦНИИгеолнеруд».

В работе конференции планируется участие известных российских и зарубежных ученых, руководителей геологических служб и недропользователей.

Темы конференции

- Прогноз, поиски и оценка месторождений промышленных минералов
- Развитие мирового рынка промышленных минералов и направления развития отечественной минерально-сырьевой базы
- Инновационные методы и методики изучения и оценки качества сырья, технологии добычи, переработки, получения высоколиквидной продукции

Контакты

По организационным вопросам: Садыков Равиль Касимович – к. г. н., заместитель директора по науке, (843) 238-74-66, E-mail: root@geolnerud.net

По программным вопросам: Лыгина Талия Зинуровна – д. г.-м. н., заместитель директора по науке, (843) 236-53-73 E-mail: root@geolnerud.net

Секретариат: Антонов Вадим Алексеевич, (843) 236-44-13, E-mail: antonov-geo@rumbler.ru
Хасанова Марина Борисовна, (843) 236-54-80, E-mail: nauka@geolnerud.net, marina-geolnerud@mail.ru

Адрес: Ул. Зинина, 4, Казань, Россия, 420097

Тел.: 8 (843) 236-47-93. Факс 8 (843) 236 47 04. E-mail: root@geolnerud.net

Подробная информация о конференции размещена на сайте: www.geolnerud.net

УДК 69.691

В.С. ЛЕСОВИК¹, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН (naukavs@mail.ru);
Л.Х. ЗАГОРОДНЮК¹, канд. техн. наук; И.Л. ЧУЛКОВА², д-р техн. наук (chulkova_il@sibadi.org);
А.Д. ТОЛСТОЙ¹, канд. техн. наук, А.А. ВОЛОДЧЕНКО¹, канд. техн. наук

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

² Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (644080, г. Омск, проспект Мира, 5)

Сродство структур как теоретическая основа проектирования композитов будущего

Реализация закона сродства структур позволяет создавать эффективные анизотропные системы твердеющего композита, в котором заложены основы реагирования на изменяющиеся условия синтеза и эксплуатации. Установлено и доказано, что в образующихся системах синтезируются новообразования и создается нано-, микро- и макроструктуры, обладающие способностью самозалечивать дефекты, возникающие в определенном диапазоне эксплуатационных нагрузок. При проектировании композитов будущего целесообразно использование положений закона сродства с созданием надежной внутренней высокоорганизованной структуры композита. Теоретические и практические подходы должны явиться предпосылкой для создания нового класса «интеллектуальных» строительных материалов изотропной структуры с эффективными свойствами.

Ключевые слова: закон сродства структур, материаловедение, композиты, функциональные свойства материалов.

V.S. LESOVIK¹ Doctor of Sciences (Engineering), Corresponding member of RAACS (naukavs@mail.ru),
L.H. ZAGORODNYUK¹, Candidate of Sciences (Engineering); I.L. CHULKOVA², Doctor of Sciences (Engineering) (chulkova_il@sibadi.org);
A.D. TOLSTOY¹, Candidate of Sciences (Engineering), A.A. VOLODCHENKO¹, Candidate of Sciences (Engineering)

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova (46, 2Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

² Siberian automobile and highway academy (5, Mira Avenue, Omsk, 644080, Russian Federation)

Affinity of structures as a theoretical basis for designing composites of the future

Implementation of the law of the affinity of structures allows to create effective systems with anisotropic hardening of the composite, which includes the foundations for responding to the changing conditions of synthesis and service. It has been established and proved that within the system new formations are synthesized and nano-, micro- and macrostructure is created, possessing self-healing ability in mending defects, caused by a particular range of operating loads. When designing the composites of the future it is advisable to use the provisions of the law of the affinity with the creation of highly reliable internal structure of the composite. Theoretical and practical approaches should be the prerequisite for the creation of a new class of "smart" construction materials with isotropic structure and effective properties.

Keywords: law of affinity structures, materials, composites, functional properties of materials.

Впервые о принципе сродства структур, который заключается в функциональной структурной иерархии, упоминалось в работе [1].

Закон сродства структур в материаловедении сформулирован [2] и предусматривает проектирование и синтез слоистых композитов и ремонтных систем на нано-, микро- и макроуровне, аналогичных базовой матрице, что приводит к существенному повышению адгезии и долговечности материалов. Подобный подход основан на принципе причинно-следственной связи процессов, происходящих при контакте различных материалов в композите, и заключается в их подобии по кристаллографической, гранулометрической микроструктуре, минеральному, химическому составу и коэффициенту термического расширения. Это обуславливает вследствие диффузии и ионного обмена их взаимодействие с образованием новых фаз и сил сцепления, обеспечивающих прочность и эксплуатационные свойства контактного слоя и композита в целом [3–5].

Для создания прочного и надежного контакта между элементами композита необходимо создать внутреннюю устойчивую связь (контактную зону), призванную обеспечить определенные физико-механические и эксплуатационные требования материала в целом. Такая контактная зона должна иметь сходство, близость, а точнее сродство по основным свойствам и общности генетического происхождения с матрицей материала. И наконец, для обеспечения такого сродства необходимо создание такой структуры, которая бы обеспечила взаиморасположение и соответствующую связь составных частей и в итоге гарантировала совместную работу этой зоны с элементами двух, а возможно, и нескольких смежных материалов.

The principle of the affinity of structures, which consists in a functional structural hierarchy was first mentioned in paper [1].

The law of the affinity of structures in materials science was formulated in [2] and assumes the design and synthesis of layer composite and repair systems at nano-, micro- and macro-level, similar to the base matrix, which leads to a significant increase in adhesion and durability of materials. This approach is based on the principle of cause-and-effect relation between the processes occurring at the contact of different materials in the composite and consists in the similarity of their crystallographic, grain microstructure, mineral, chemical composition and thermal expansion coefficient. Due to diffusion and ion exchange this causes, their interaction with the formation of new phases and cohesive forces that provide strength and service characteristics of the contact layer and the composite as a whole [3–5].

To create a lasting and reliable contact between the elements of a composite it is necessary to create a stable internal conjunction (contact zone), designed to provide a specific physico-mechanical and operational requirements of the material as a whole. This contact zone should have a similarity, proximity, to be more exact – affinity by basic properties and common genetic origin with the matrix material. Finally, to ensure that such affinity is necessary to create a such a structure so that it could provide relative positions and sufficient connection between the constituent parts and would eventually guarantee joint work of this zone with the elements of two, and possibly more adjoining materials.

Considering practical implementation of the proposed law of the affinity of structures in building materials sci-

Таблица 1
Table 1

Наименование показателя Name of the characteristic	На крупнозернистых песках On coarse grain sands			На мелкозернистых песках On fine grain sands		
	Технические требования Technical requirements	Результаты испытаний Test results		Технические требования Technical requirements	Результаты испытаний Test results	
		КВ CB	КОММ COMM		КВ CB	КОММ COMM
Наибольший размер зерен заполнителя, мм, не более Maxim grain size of the aggregate, mm, no more	1,25	1,25	1,25	0,63	0,63	0,63
Влажность смеси, %, не более Moisture content in the mix, %, no more	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
Подвижность, Пк Movement, Pa	Пк1 Pa 1	Пк1 Pa 1	Пк1 Pa 1	Пк3 Pa 3	Пк3 Pa 3	Пк3 Pa 3
Сохраняемость подвижности, мин, не менее Keeping movement, min, no less than	45	45	45	45	45	45
Прочность при сжатии, МПа, через: Compression strength, MPa, in:						
1 сут / 1 day	–	–	–	10	13	19
3 сут / 3 days	20	37	42	30	35	47
28 сут / 28 days	40	52	64	45	58	68
Прочность при изгибе через 28 сут, МПа, не менее Bending strength in 28 days, MPa, no less than	5	6,5	7,2	5	7,3	7,9
Прочность сцепления с бетонным основанием через 28 сут, МПа, не менее Cohesion strength with the concrete base in 28 days, MPa, no less than	1	1,7	2,3	1	1,9	2,8
Деформации в возрасте 28 сут, %, не более (усадка) Deformations 28 days of age, %, no more than (shrinkage)	-0,1	0	0	-0,1	0	0
Морозостойкость, циклы Frost resistance, cycles	Не менее 50	60	75	Не менее 50	60	75
Коэффициент термического расширения Thermal expansion coefficient	Нет	6,1	6,7	Нет	6,3	6,9

Рассматривая практическую реализацию предложенного закона сродства структур в строительном материаловедении, можно привести ряд примеров по созданию целевых строительных композитов различного функционального назначения [6–9].

Проведенными исследованиями с учетом закона сродства структур доказана возможность направленного изменения капиллярно-пористой структуры и управления влагопереносом в известковом и цементном камне при совместном применении добавок суперпластификаторов и минеральных наполнителей с определенной гранулометрией, что позволило запроектировать композиты на основе вяжущих веществ для реставрации памятников старины. Данная методика апробирована при реставрации ансамблей Царицыно и Ростова Великого, архитектурных, исторических и культурных памятников в Сибири (см. рисунок) и Болгарии.

Применение принципов закона сродства структур при проектировании ремонтных смесей позволило получить растворы с заданными технологическими, физико-механическими и эксплуатационными свойствами за счет формирования системы из составляющих его элементов: заполнителя, наполнителя, эффективного композиционного вяжущего и функциональных добавок, при твердении которой синтезируется композит, идентичный на нано-, микро- и макроуровне ремонтируемой матрице.

С учетом закона сродства структур разработан комплексный органо-минеральный модификатор (КОММ) на основе сырьевых ресурсов КМА и отечественных компонентов. Микроструктура КОММ характеризуется густой микроармированной матрицей, приводящей к повышению адгезии к восстанавливаемому основанию до

ence, a number of examples may be given to create targeted building composites of various functional purpose [6–9].

The research with the account of the law of affinity of structures has proved possible targeted changes of capillary-porous structure and water transfer control in lime and cement stone with combined use of superplasticizer additives and mineral admixtures with a specific particle size, which made it possible to design composite based binders for the restoration of monuments of antiquity. This methodology was tested in the restoration of ensembles of Tsaritsyno and Rostov the Great, architectural, historical and cultural monuments in Siberia (Figure), and Bulgaria.

Application of the principles of the law of the affinity of structures in designing repair mixes allowed to obtain solutions with predetermined technological, physical, mechanical and performance properties due to formation of the system of its constituent elements: an admixture, aggregate, an effective composite binder and functional additives, during the hardening of which a composite is synthesized, which is identical to nano-, micro- and macro-level matrix to be repaired. With the account of the law of the affinity of structures a complex organic-mineral modifier (COMM) was developed based on raw materials of Kursk Magnetic Anomaly and locally made components. COMM microstructure is characterized by micro-reinforced matrix, resulting in increased adhesion to the base being restored up to 50%, reduction of shrinkage and increase in the frost resistance. Based on comprehensive research dry mixes were obtained for surface repair compositions on coarse and fine-grained sands, quartzite sand crushing screenings. The main indicators of the quality of repair solutions prepared for composites and binders COMM are

50%, снижению усадочных явлений и повышению морозостойкости. На основании комплексных исследований разработаны сухие строительные смеси для поверхностных ремонтных составов на крупнозернистых и мелкозернистых песках-отсевах дробления кварцитопесчаников. Основные показатели качества этих растворов, приготовленных на композиционных вяжущих и КОММ, представлены в табл. 1. Установлены допустимые величины различий коэффициентов термического расширения (не более 8%) основного базового слоя и ремонтных растворов, не приводящих к разрушению, что обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики отремонтированных зданий и сооружений. Ремонтные растворы, спроектированные с учетом закона сродства структур, позволяют увеличить сцепление с основанием в 2,8 раза, повысить морозостойкость на 50% [4–6].

Использование закона сродства структур позволило создать новый эффективный теплоизоляционно-конструкционный силикатный материал на основе активных гранулированных заполнителей с высокоразвитой поверхностью, со стабильно высокими теплоизоляционными свойствами (0,2 Вт/(К·м)) и снизить массу стеновых конструкций. Увеличение адгезии разработанных кладочных растворов к стеновому материалу с высокоразвитой поверхностью по сравнению с кладкой из силикатного кирпича и традиционных растворов позволило увеличить прочность кладки на срез в 25–30 раз, что особенно важно в сейсмоопасных регионах и повышением требований к сейсмическим растворам [7, 8].

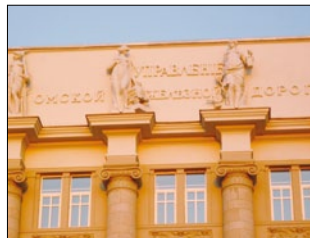
С учетом сродства структур получены высокоэффективные кладочные растворы на основе специальных композиционных вяжущих, способных аккумулировать и удерживать необходимую влагу для гидратации в условиях кладки, позволяющие получать кладочные растворы, по совокупности значимых показателей в 2–3 раза превосходящие традиционные и дешевле по стоимости сухих строительных смесей аналогичного назначения.

На основе предложенных принципов повышения эффективности сухих теплоизоляционных смесей с учетом закона сродства структур предусмотрено проектирование слоистых композитов на нано-, микро- и макроуровне, полученных за счет использования композиционных вяжущих, синтезированных при совместном помоле цемента, пластификаторов-модификаторов и минеральных наполнителей определенного генезиса, состава, гранулометрии и морфологии частиц, что приводит к самоорганизации системы и созданию гомогенной структуры в зависимости от характеристик базовой поверхности и обеспечивает получение эффективных композитов с высокими теплозащитными характеристиками (табл. 2).

Получение высокоэффективных теплоизоляционных растворов нового поколения сегодня сопровождается использованием сложных с химической и минеральной точки зрения составов компонентов с целью получения высококачественных строительных материалов различного функционального назначения с улучшенными, а иногда с принципиально новыми свойствами и определенной, заранее заданной структурой.

Таким образом, реализация закона сродства структур позволяет создавать эффективные системы твердеющего композита, в котором заложены основы реагирования на изменяющиеся условия синтеза и эксплуатации. Установлено и доказано, что в образующихся системах синтезируются новообразования и создается нано-, микро- и макроструктура, обладающая способностью самозалечивать дефекты, возникающие в определенном диапазоне эксплуатационных нагрузок.

Все рассмотренные выше строительные композиции, созданные с учетом сродства структур, относятся к растворным тонкослойным композиционным системам, т. е. это анизотропные композиты.



Пример реализации закона сродства структур при реставрации Ставки Колчака в Омске

Example of realization of the law of the affinity of structures during Kolchak's General Headquarters in the city of Omsk

shown in Table 1. Allowable values were determined for the difference in coefficients of thermal expansion (not exceeding 8%) of the base layer and repair mortars which do not result in the destruction, thus providing high service characteristics of renovated buildings. Repair solutions obtained taking into account the law of the affinity of structures can increase adhesion to the base by 2.8 times as well as increase frost resistance [4–6].

Using the law of the affinity of structures has created new effective thermal insulation, structural silicate material on the basis of active granular aggregates with highly developed surface, with consistently high insulation properties 0.2 W/(m·K), and reduce the weight of wall construction. Increased adhesion of mortars to the wall materials with highly developed surface compared with the masonry of silicate brick and traditional solutions has increased the strength of the masonry by 25–30 times, which is especially important in seismic regions and stronger requirements to seismic mortars [7, 8].

Given the affinity of structures highly efficient masonry mortars based on special composite binders have been obtained, able to accumulate and retain required moisture for hydration in conditions of masonry, allowing to obtain masonry mortars, which, by total significant indicators are superior to conventional ones by 2–3 times and cheaper compared to dry mixes of similar purpose.

On the basis of the proposed principles to improve the efficiency of thermal insulation dry mixes with the account of the law of the affinity of structures it is assumed to design layered composites at nano, micro and macro levels, obtained through the use of composite binders synthesized at the joint grinding of cement, plasticizers, modifiers and mineral admixtures of particular genesis, composition, particle size and morphology of the particles; which results in self-regulation of the system and creating homogeneous structure, depending on the characteristics of the base surface and ensures obtaining of efficient composites with high heat-insulating characteristics (Table 2).

Obtaining high-performance thermal insulation solutions of the new generation today is accompanied by the use of sophisticated chemical and mineral composition from point of view of the components in order to obtain high-quality construction materials for various purposes with the improved, sometimes with radically new properties and certain predetermined structure.

Thus, the implementation of the law of the affinity of structures allows to create effective systems of hardening of the composite, which laid the foundation for responding to the changing conditions of synthesis and use, it has been found and proven that in the system new formations are formed, including neoplasms and nano-, micro- and macrostructure possessing self-healing ability to mend defects, caused by a certain range of operating loads.

All the above construction compositions, created with the account of the affinity of structures are related to thin layer mortar composition system, i.e. they are anisotropic composites.

Таблица 2
Table 2

Наименование показателя Name of the indicator	Нормативные значения Standard values	Результаты испытаний Test results		
		Состав 1 Composition 1	Состав 2 Composition 2	Thermover (Турция) Thermover (Turkey)
Средняя плотность теплоизоляционного раствора, кг/м ³ , не более Average density of heat insulating mortar, kg/m ³ , no more than	500	285	305	470
Водоудерживающая способность, %, не менее Water-retaining capacity, %, no less than	90	93,9	91,8	87
Прочность сцепления с основанием, МПа, не менее Cohesion strength to the base, MPa, no less than	0,2	0,26	0,28	0,1
Водопоглощение при капиллярном подсосе, кг/м ² Water absorption during capillary suction, kg/m ²	-	4,82	4,44	7,3
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па), не менее Coefficient of vapor permeability, mg/(m·h·Pa), no less than	0,02	0,08	0,06	0,07
Усадка покрытия (отсутствие трещин в слое проектной толщины) Shrinkage of coating (absence of cracks in the layer)	Трещин нет No cracks	Трещин нет No cracks		-
Прочность при сжатии, МПа, не менее Compression strength, MPa, no less than	1	1,05	1,22	2
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), не более heat conduction coefficient, W/(m·°C), no more than	0,2	0,06	0,07	0,1
Морозостойкость, циклов, не менее Frost resistance, cycles, no less than	50	73	75	60

Современное материаловедение переживает серьезный этап развития, при этом в последние десятилетия в технологии бетона прослеживается эволюция вытеснения бетонов с крупными заполнителями мелкими, таким образом, идет переход: бутобетоны → бетоны на крупном заполнителе → мелкозернистые бетоны → порошковые бетоны → нанобетоны. Эта тенденция направлена на постепенное вытеснение и замещение крупного заполнителя мелким, что приводит к уменьшению размеров частиц, слагающих композит, т. е. к содержанию тонко- и мелкодисперсных структур.

Каждый эволюционный тип бетонов имеет свои физико-механические свойства и особенности проектирования в зависимости от функционального назначения до используемых материалов – вяжущих и заполнителей, их гранулометрического состава.

При создании порошковых и нанобетонов все компоненты имеют высокую удельную поверхность, при повышенной поверхности взаимодействия создаются наилучшие условия для гидратации и образования гомогенной равномерно распределенной структуры.

Такой подход предполагает тщательный подбор сырьевых компонентов – цемента, минеральных составляющих, органических добавок. Кроме того, необходима высокая культура при реализации эффективных технологических приемов.

Выбор цемента и заполнителей и их характеристики предопределяют существенное повышение их эксплуатационных характеристик.

В современных композитах, учитывая высокую дисперсность их составляющих материалов, открывается возможность создать изотропную структуру, которая бы обеспечила композиту высокую прочность. Представляется необходимым использовать принципы закона сродства структур, что позволит создать высокоэффективные композиты будущего. Для формирования плотной изотропной структуры необходимо при проектировании композита заложить систему взаимодействия с окружающей средой, позволяющей материалам реагировать на внешние воздействия и положительно влиять на триаду человек–материал–среда обитания. При проектировании изотропных систем необходимо учитывать коэффициенты термического расширения слагающих компонентов, так как их

Modern materials science is experiencing a serious stage of development, while in the last decades the technology of concrete is characterized by the evolution of substituting of concrete with coarse aggregate by small grain ones, so there is a following transition: stone concrete → concrete on coarse aggregate → fine-grained concrete → powder concrete → nano concrete. This tendency is aimed at gradual replacement of the coarse aggregate by fine aggregate, which reduces the particle size forming the composite i. e. to the composition of fine and finely divided structures.

Each evolutionary type of concrete has its physical and mechanical properties and project features, depending on the functional purpose and the materials used – binders and fillers, their particle size distribution.

When creating nano concrete or powder concrete all the components have a high specific surface area at increased surface interaction, which creates the best conditions for hydration and formation of a homogeneous uniform distributed structure.

This approach involves careful selection of raw materials – cement, mineral components and organic additives. In addition, high culture is needed in the implementation of efficient production methods. Selection of cement and aggregates as well as their characteristics determine significant increase in their service characteristics. Modern composites, given high dispersion of their constituent materials, offer the possibility to create an isotropic structure, which would provide a high strength composite. It seems necessary to use the principles of the law of affinity of structures that will create high-performance composites of the future. In order to form a dense isotropic structure it is necessary at the project stage to lay a system of interaction with the environment, allowing the material to react to external influences and have a positive impact on the triad of “man-material-habitat”. When designing isotropic systems it must be taken into account thermal expansion coefficients of the constituent components, as their different values result in defects, consequent weakening and destruction, evidenced by the analysis of rock destruction.

Thus, for example, frost resistance of granite composed of quartz, orthoclase, plagioclase, biotite, musco-

различные величины приводят к возникновению дефектов, последующему разупрочнению и разрушению, об этом свидетельствует анализ разрушения горных пород.

Так, например, морозостойкость гранита, состоящего из кварца, ортоклаза, плагиоклаза, биотита, мусковита, роговой обманки, меньше, чем морозостойкость более однородных базальтов. Учет этих факторов позволит сформировать прочную и надежную структуру композита.

В тонкозернистых композитах будущего создается огромная площадь для взаимодействия вяжущего с наполнителями и заполнителями, в десятки и сотни тысяч раз превосходящими площадь соприкосновения компонентов крупнозернистых бетонов. Для создания изотропных систем, которые соответствуют порошковым высокопрочным бетонам, в качестве мелкого наполнителя целесообразно использовать сырьевые компоненты, близкие по своим минеральным характеристикам коэффициентам термического расширения.

В плане развития этих представлений при проектировании композитов будущего целесообразно использование положений закона сродства с созданием надежной внутренней высокоорганизованной структурой композита.

Таким образом, реализация закона сродства структур предполагает создание системы твердеющего композита, при проектировании которого необходимо использовать вяжущее и минеральные составляющие с близкими коэффициентами термического расширения и высокой адгезией, в котором заложены основы реагирования на изменяющиеся условия синтеза и эксплуатации; целенаправленно синтезируются новообразования и создается нано-, микро- и макроструктура, обладающая способностью залечивать дефекты, возникающие в определенном диапазоне эксплуатационных нагрузок. Теоретические и практические подходы должны явиться предпосылкой для создания нового класса «интеллектуальных» строительных материалов изотропной структуры с эффективными свойствами.

Список литературы

1. Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Управление структурообразованием строительных композитов: Монография. Омск: СибАДИ, 2011. 462 с.
2. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Чулкова И.Л. Закон сродства структур в материаловедении // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 3. Ч. 2. С. 267–271.
3. Чулкова И.Л. Структурообразование строительных композитов на основе принципа сродства структур // *Вестник СибАДИ*. 2012. № 6. С. 83–88.
4. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Беликов Д.А., Шекина А.Ю., Куприна А.А. Эффективные сухие смеси для ремонтных и восстановительных работ // *Строительные материалы*. 2014. № 7. С. 82–85.
5. Lesovik V.S., Zagorodnuk L.H., Shkarin A.V., Belikov D.A., Kuprina A.A. Creating effective insulation solutions, taking into account the law of affinity structures in construction materials // *World Applied Sciences Journal*. 2013. No. 24 (11), pp. 1496–1502.
6. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Ильинская Г.Г., Беликов Д.А. Сухие строительные смеси для ремонтных работ на композиционных вяжущих: Монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 147 с.
7. Лесовик В.С., Мосьпан А.В. Прессованные силикатные изделия на гранулированных заполнителях // *Известия КГАСУ*. 2012. № 3. С. 144–150.
8. Лесовик В.С., Мосьпан А.В., Беленцов Ю.А. Силикатные изделия на гранулированных заполнителях для сейсмостойкого строительства // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2012. № 4. С. 62–65.
9. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyk L.H., Elistratkin M.Y. Anisotropy of materials properties of natural and man-triggered origin // *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 9. No. 11, pp. 816–819.

vite, hornblende is less than frost resistance of more homogenous basalts. Taking these factors into consideration will create a solid and reliable structure of the composite.

In the fine-grained composites of the future a huge area for interaction between a binder and aggregates is being created, tens or hundreds of thousands of times exceeding the area of contact of coarse aggregate concrete. To create isotropic systems, which correspond to high strength powder concrete, it is recommended to use raw material components which are close in their mineral characteristics, the coefficients of thermal expansion as fine grain concrete.

In terms of the development of these concepts in the design of the future of composites it is advisable to use the provisions of the law of the affinity of structures with the creation of highly reliable internal structure of the composite.

Thus, the implementation of the law of the affinity of structures involves the creation of composite hardening, in the process of obtaining of which it is necessary to use a binder and mineral components with similar coefficients of thermal expansion and high adhesion, which have the foundations for responding to changing conditions of synthesis and operation; neoplasms are intentionally synthesized and nano-, micro- and macrostructure are created, which has the ability to heal the defects which appear within a certain range of operating loads. Theoretical and practical approaches should be the prerequisite for the creation of a new class of “smart” construction materials with isotropic structure and effective properties.

References

1. Lesovik V.S., Chulkov I.L. Upravlenie strukturoobrazovaniem stroitel'nykh kompozitov: monografiya [Control of building composite structure formation: Monograph]. Omsk: SibADI. 2011. 462 p.
2. Lesovik V.S., Zagorodnuk L.H., Chulkova I.L. Law of the affinity of structures in materials science. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014. No. 3. P. 2, pp. 267–271. (In Russian).
3. Chulkova I.L. Structurization of building composites on the basis of the affinity structures. *Vestnik SibADI*. 2012. No. 6, pp. 83–88. (In Russian).
4. Lesovik V.S., Zagorodnuk L.H., Belikov D.A., Shchekina A.U., Kuprina A.A. Effective dry mixes for repair and restoration works. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 7, pp. 82–85.
5. Lesovik V.S., Zagorodnuk L.H., Shkarin A.V., Belikov D.A., Kuprina A.A. Creating effective insulation solutions, taking into account the law of affinity structures in construction materials. *World Applied Sciences Journal*. 2013. No. 24 (11), pp. 1496–1502.
6. Lesovik, V.S., Zagorodnuk L.H., Elias G.G., Belikov D.A. Sukhie stroitel'nye smesi dlya remontnykh rabot na kompozitsionnykh vyazhushchikh: monografiya [Dry mixes for repairs on composite binders: monograph]. Belgorod: BSTU. 2013. 147 p.
7. Lesovik V.S. Mospan A.V. Pressed silicate products for granular aggregates. *Izvestiya KGASU*. 2012. No. 3, pp. 144–150. (In Russian).
8. Lesovik V.S., Mospan A.V., Belentsov Yu.A. Silicate products to granular aggregates for earthquake engineering. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2012. No. 4, pp. 62–65. (In Russian).
9. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyk L.H., Elistratkin M.Y. Anisotropy of materials properties of natural and man-triggered origin. *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 9. No. 11, pp. 816–819.

УДК 620.173.21+691.32:691.542

А.С. ИНОЗЕМЦЕВ, канд. техн. наук, Е.В. КОРОЛЕВ, д-р техн. наук,
директор Научно-образовательного центра «Наноматериалы и нанотехнологии»
Московский государственный строительный университет (129337, Москва, Ярославское ш., 26)

Деформации высокопрочных легких бетонов на полых микросферах и способ их снижения*

Представлены результаты исследования деформационных свойств высокопрочных легких бетонов на полых микросферах. Предложена методика повышения трещиностойкости высокопрочных легких бетонов на алюмосиликатных микросферах, заключающаяся в создании на поверхности полого заполнителя активной железисто-кремнеземистой оболочки, вступающей во взаимодействие с основными компонентами и продуктами гидратации цемента, упрочняя границу раздела фаз. Показано, что полые микросферы являются перспективным заполнителем для получения легких бетонов с повышенными эксплуатационными свойствами. Установлено, что коэффициент трещиностойкости таких бетонов, оцениваемый по отношению предела прочности при изгибе к пределу прочности при сжатии, сопоставим с показателем мелкозернистых высокопрочных тяжелых бетонов и составляет более 0,1. Модифицирование поверхности полых микросфер наноразмерным модификатором на основе коллоидных растворов гидроксида железа и кремниевой кислоты для увеличения адгезии на границе раздела фаз приводит к снижению продольных и поперечных деформаций высокопрочных легких бетонов на 7–12% и 8,5–16,5% соответственно. Модуль упругости наномодифицированного высокопрочного легкого бетона составляет 6–8,5 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,08–0,14. Интенсивность трещинообразования высокопрочного легкого бетона при воздействии усадочных напряжений снижается на 56,9% при использовании полых микросфер, аппретированных активным наномодификатором.

Ключевые слова: высокопрочный легкий бетон, конструкционный легкий бетон, полые микросферы, наномодификатор, нанотехнологии.

A.S. INOZEMTCEV, Candidate of Sciences (Engineering) (InozemcevAS@mgsu.ru),
E.V. KOROLEV, Doctor of Sciences (Engineering), director, research and educational center «Nanomaterials and Nanotechnology»
Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Deformations of High-Strength Lightweight Concrete Having Hollow Microspheres and Method of Reduce Them*

The paper presents the researching results of deformation properties of the high-strength lightweight concrete with hollow microspheres. The method of increasing the fracture toughness of high-strength lightweight concrete with aluminosilicate microspheres by using the modifier as a coupling agent on the surface of the microparticles of aggregate is proposed. The hollow microspheres are perspective filler for lightweight concrete with high performance characteristics; the increasing of content of the spherical microparticles in the concrete composition promotes to forming close-packed structure with low deformations. The coefficient of fracture toughness of the high-strength lightweight concrete is comparable with the same parameter for fine-grained high-strength heavy concrete (more than 0.1) and is limited by strength characteristics of micrometric particles of aggregate. It is to create the active iron-silica shell on the surface of the hollow filler, which interacts with the major components and products of the cement hydration and reinforces the phase boundary. The proposed method of modifying allows to reduce the longitudinal and transverse deformations of the high-strength lightweight concrete at 7–12% and 8.5–16.5% respectively. The elastic modulus of the high-strength lightweight concrete is 6–8.5 GPa, and Poisson's ratio is 0.08–0.14. The nanomodifier reduces the intensity of the cracking under the influence of shrinkage stresses of high-strength lightweight concrete by 56.9%.

Keywords: high-strength lightweight concrete, structural lightweight concrete, hollow microspheres, nanoscale modifier, nanotechnology.

В настоящее время общепризнанной мировой тенденцией является решение задачи по комбинированию положительных качеств тяжелых и легких цементных бетонов [1–5]. Накоплен богатый опыт [6–9] создания конструкционно-теплоизоляционных материалов, применение которых позволит снизить затраты строительства объектов промышленного и гражданского назначения. В России для создания таких бетонов предложено использовать полые стеклянные или алюмосиликатные микросферы [10–13]. Существует практика применения легких бетонов на полых микросферах в дорожных плитах при реконструкции моста через Волгу [14]. В [15, 16] показано, что увеличение доли полых микросфер в составе бетона приводит к формированию плотноупакованной структуры, в которой близко расположенные полые микросферы способствуют ветвлению трещин и повышению удельной прочности (ранее указанное свойство имело название «коэффициент конструкционного качества») за счет меньшей скорости снижения предела прочности при сжатии, чем скорость снижения средней плотности. То есть

Currently, the task of combining the positive qualities of light and heavy cement concrete is a recognized global trend [1–5]. Extensive experience [6–9] in establishing constructional and thermal insulation materials is accumulated around the world. In Russia [10–13] the using of the hollow glass and alumina-silicate microspheres is suggested for creating the such concrete. There are practical applications of lightweight concrete with microspheres for road plates in the reconstruction of the bridge over the Volga-river [14]. Authors [15, 16] shown that increasing the volume fraction of the hollow microspheres promotes to forming the close-packed structure where microsized

Таблица 1
Table 1

		Содержание, % Content, %								
Соединение Compound	C ₃ S			C ₂ S		C ₃ A			C ₄ AF	
	61,5			16,1		6,2			6,2	
Вещество Substance	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	CaSO ₄	R ₂ O	ППП/LOI
		23,4	5	4	60,4	1,1	2,8	0,003	5,4	0,75

* Печатается при поддержке гранта Президента РФ молодым ученым МК-5950.2015.8.
* Supported of the grant of the President RF for young scientists MK-5950.2015.8.

Таблица 2
Table 2

Состав Composition label	Проектная плотность, $\times 10^3$ кг/м ³ Project density, $\times 10^3$ kg/m ³	Содержание компонента, % мас. Content, % mas.					Σ
		Цемент Cement C	Микросферы Microspheres MS	Кварцевый песок Quartz sand QS	Минеральные добавки Mineral additives MA	Вода* Water W*	
0	2,4	29,7	–	43,2	17,8	9,3	100
1; 4 ^М 1; 4 ^м	1,3	48	21,8	2,8	9,9	17,5	
2; 5 ^М 2; 5 ^м	1,4	44,6	18,5	9,2	11,4	16,2	
3; 6 ^М 3; 6 ^м	1,5	41,6	15,6	14,9	12,8	15,2	

Примечания: Состав 0 – мелкозернистый высокопрочный тяжелый бетон; состав 1–6 – высокопрочный легкий бетон; где индекс «М» обозначены составы, приготовленные на модифицированных микросферах; * с учетом расхода пластифицирующей добавки Melflux 1641F 0,8% от массы цемента.
Notes: Composition 0 – composition of the fine-grained high-strength heavy concrete; Composition 1–6 – composition of the high-strength lightweight concrete, where index m – composition with modified microspheres; * There is taken into account the content of the plasticizer (Melflux 1641F) 0,8% by weight of cement.

Таблица 3
Table 3

Состав Composition	Объемная доля полых микросфер v_f Volume fraction of the hollow microspheres v_f	Средняя плотность ρ_{cp} , $\times 10^3$ кг/м ³ Average density ρ_{cp} , $\times 10^3$ kg/m ³	Предел прочности при изгибе $R_{изг}$, МПа Flexural strength R_f , MPa	Предел прочности при сжатии (кубиковая прочность) $R_{сж}$, МПа Compressive strength (cube) R_{com} , MPa	Коэффициент трещиностойкости $k_{тр}$ Coefficient of fracture toughness k_f
0	0	2,32	19,1	115,1	0,166
1	0,532	1,25	4,9	45,3	0,108
2	0,485	1,35	6,6	47,6	0,139
3	0,438	1,46	7,8	54	0,145
4 ^М 4 ^м	0,532	1,28	5	49,7	0,101
5 ^М 5 ^м	0,485	1,37	5,7	51,4	0,11
6 ^М 6 ^м	0,438	1,48	7,3	62,1	0,116

использование микросфер правильной геометрической формы в составе бетона обеспечивает экстремальную зависимость изменения удельной прочности от средней плотности. Однако, несмотря на перспективное сочетание низкой средней плотности и высокой прочности таких высокопрочных легких бетонов (ВПЛБ), для их реализации в нагружаемых конструкциях необходимо уделять особое внимание деформативным свойствам при воздействии эксплуатационных нагрузок.

Исследование деформативных свойств высокопрочного легкого бетона осуществлялось на составах, приготовленных с использованием портландцемента СЕМ I-42.5 R производства ОАО «Мордовцемент» (ГОСТ 31108–2003 «Цементы общестроительные. Технические условия»); химико-минералогический состав клинкера представлен в табл. 1.

Минеральная часть представлена кремнеземистыми фракциями различной дисперсности: кварцевый песок (фракции 0,16–0,63 мм), каменная мука (удельная поверхность 700–800 м²/кг) и микрокремнезем. Дисперсный состав выбирался исходя из требования обеспечения формирования плотного каркаса за счет заполнения частицами мелких фракций пустот между частицами крупных фракций. В качестве функционального наполнителя были выбраны полые алюмосиликатные микросферы (средний диаметр частиц 70 мкм) с содержанием SiO₂ и Al₂O₃ в количестве 58–62 и 32–38% соответственно.

Определение физико-механических свойств осуществляли по ГОСТ 10180–90 «Бетоны. Методы определения прочности при сжатии и изгибе по контрольным образцам» (or ASTM C39/C39M «Test Method for Compressive

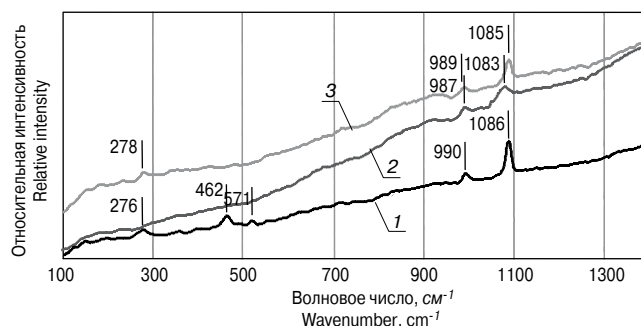


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния, демонстрирующие повышение относительной интенсивности пиков при 278, 989 и 185 см⁻¹ на границе цементный камень/микросферы, характерных для внутренних деформаций связей Si–O и O–Si–O, что свидетельствует об образовании дополнительных силикатных соединений: 1 – КР-спектр цементного камня; 2 – КР-спектр границы раздела цементный камень/микросфера; 3 – КР-спектр границы раздела цементный камень/модифицированная микросфера

Fig. 1. Raman spectra which demonstrate the increase of the peaks intensity at 278, 989 and 185 cm⁻¹ on the interface of cement stone/microspheres for internal deformation of the Si–O and O–Si–O bonds that indicates the formation of the additional silicate compounds: 1 – Raman spectra of cement stone; 2 – Raman spectra of the interface boundary between cement stone and microsphere; 3 – Raman spectra of the interface boundary between cement stone and nanomodified microsphere

particles of filler provide to branching the cracks and increasing the specific strength. However, implementation of such a combination of low average density and high strength of the high-strength lightweight concrete (HSLW) in practice requires a special attention to the structure and

Strength of Cylindrical Concrete Specimens») на образцах-кубах 70 мм и балочках 40×40×160 мм соответственно, на сервогидравлическом прессе «Advantest 9» с программным управлением. Модуль упругости и коэффициент Пуассона определяли в соответствии с ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» (or ASTM C469/C469M – 14 «Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression») на образцах-призмах размером 70×70×280 мм. Испытания проводились на прессе «Advantest 9» с датчиками высокой точности (универсальный электронный экстензометр) чувствительностью до 0,02 мкм (ASTM C469, ISO 6784, DIN 1048, UNI 6556)*.

Коэффициент трещиностойкости оценивали методом МИИТ [17, 18]. Две серии образцов в возрасте 28 сут выдерживались в воде в течение 6 сут. Определялся предел прочности при сжатии и изгибе для первой серии образцов в водонасыщенном состоянии (R'), для второй серии – после выдерживания в течение 24 ч в воздушно-сухих условиях при относительной влажности воздуха от 40 до 60% и температуре 30–40°C (R''). Так как под действием усадки и других факторов происходит образование различного рода локальных трещин, трещиностойкость оценивается по формуле:

$$k_{тр} = \frac{R''}{R'}$$

В процессе эксплуатации материал испытывает воздействие различных эксплуатационных факторов, которые приводят к образованию трещин и разрушению материала. Поэтому для оценки трещиностойкости высокопрочных легких бетонов использовали коэффициент трещиностойкости, характеризующий отношение предела прочности при изгибе к пределу прочности при сжатии. Исследование осуществлялось на составах высокопрочного легкого бетона (табл. 2) на полых алюмосиликатных микросферах. Так как при формировании прочной цементно-минеральной матрицы, обволакивающей микрочастицы наполнителя, процессы разрушения материала будут зависеть от характеристик сцепления цементного камня и наполнителя. Для повышения сопротивляемости к формированию и развитию трещин целесообразно использовать методы, повышающие адгезию на границе раздела фаз. В качестве модификатора предложена наноразмерная добавка «BisNanoActivus» на основе золя гидроксида железа и кремниевой кислоты [19, 20], применение которой основывается на ее нанесении на поверхность микросфер. Химическое взаимодействие, интенсифицируемое предлагаемым модификатором, обеспечит формирование дополнительных продуктов гидратации в зоне контакта (рис. 1) и упрочнит границу раздела фаз. Анализ исследуемых свойств осуществлялся в сравнении с показателями высокопрочного мелкозернистого тяжелого бетона. Результаты исследований показаны в табл. 3.

Представленные в табл. 3 экспериментальные данные свидетельствуют о том, что разработанные высокопрочные легкие бетоны обладают сопоставимыми с высокопрочным тяжелым мелкозернистым бетоном показателем трещиностойкости, рассчитанным как отношение предела прочности при изгибе к пределу прочности при сжатии. При этом снижение средней плотности легкого бетона за счет увеличения содержания полых микросфер приводит к снижению указанного показателя, что объясняется уменьшением толщины прослойки цементного камня. Видно, что составы немодифицированного высокопрочного легкого бетона обладают большим на 6–20% (в зависимости от средней плотности) коэффициентом трещиностойкости по сравнению с об-

деформации этого материала под влиянием эксплуатационных нагрузок.

The Portlandcement CEMI-42.5R («Mordovcement») was used for preparation the test samples of the concrete with the next chemical composition:

The mineral part of concrete mixture includes siliceous materials different dispersion: quartz sand (fraction – 0.16–0.63 mm), stone powder (specific surface area – 700–800 m²/kg) and microsilica (particle size – less than 10 mkm). The hollow alumina-silicate hollow microspheres was chosen as a functional filler with SiO₂ and Al₂O₃ content in the amount 58–62% and 32–38% respectively.

The physical and mechanical properties was determined using by the samples of the cubes 70 mm and prisms 40×40×160 mm according to ASTM C39/C39M «Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens». ASTM C469/C469M – 14 «Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression» was used for determination of Elastic modulus and Poisson's ratio by the prisms 70×70×280 mm*.

The coefficient of fracture toughness was evaluated by the MIIT method [17, 18] according to formula:

$$k_{fr} = \frac{R''}{R'}$$

where R' – flexural or compressive strength of the water-saturated samples for 6 days, MPa; R'' – flexural or compressive strength of the dried samples in condition at the relative humidity from 40 to 60% and temperature 30–40°C, MPa.

The different operational factors lead to the formation of cracks and destruction of the material when it is operated in constructions. That is why relation of tensile and compressive strength as a coefficient of fracture toughness is important characteristics for structural concrete. In this research the composition of high-strength lightweight concrete (Table 2) was used. The processes of destruction depend on adhesion properties of the cement stone to filler particles. For increasing the resistance to forming and development of the cracks need to use the methods which improve strength in the interface boundary. The nanoscale additive «BisNanoActivus» [19] based on sol of iron hydroxide and silicic acid is offered as a adhesive. The chemical interaction intensified by the proposed modifier will provide to forming additional products of cement hydration in the contact zone (Fig. 1) and will strengthen the phase boundary.

The analysis of the examined properties was carried out in comparison with the high-strength fine-grained heavy concrete. The results of studies are shown in Table 3.

The experimental data in Table 3 show that developed high-strength lightweight concrete has fracture toughness comparable with heavy concrete. It can be seen that the increasing the content of the hollow microspheres leads to a decrease of this parameter. It is explained by smaller thickness of layer of cement paste at low average density of concrete. The compositions of the unmodified high-strength lightweight concrete have more fracture toughness comparable at 6–20% (depending on the average density) than composition with nanomodifier.

The reason for this decreasing of the fracture toughness is exclusively arithmetic:

$$k_{fr} = \frac{R_{fs}}{R_{com}}$$

where R_{fs} и R_{com} – flexural and compressive strength, respectively.

* Подробная информация о технических характеристиках используемого оборудования на сайте www.nocnt.ru/oborudovanie.
* Detailed information on the specifications of the equipment used on the site www.nocnt.ru/oborudovanie

Таблица 4
Table 4

Состав Composition	$\rho_{\text{ср}}, \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ $\rho_{\text{ср}}, \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$R_{\text{сж}}, \text{ МПа}$ $R_{\text{сж}}, \text{ МПа}$	Удельная прочность $R_{\text{уд}}, \text{ МПа}$ Specific strength $R_{\text{сп}}, \text{ МПа}$		Призменная прочность $R_{\text{пр}}, \text{ МПа}$ Prism strength $R_{\text{пр}}, \text{ МПа}$		
1	1,29	45,3	35,1		41,8		
2	1,38	49,4	35,8		44,2		
3	1,48	54,9	37		47		
4 ^М 4 ^м	1,29	52,2	+15,2%*	40,5	+15,5%	47,4	+13,4%
5 ^М 5 ^м	1,39	55,2	+11,7%	39,7	+11,1%	49,7	+12,4%
6 ^М 6 ^м	1,5	65,8	+19,9%	43,9	+18,7%	56,5	+20,2%
0	2,34	122,2	52,3		93,4		

Примечание: * изменения показателя для наномодифицированного высокопрочного легкого бетона по отношению к составу с аналогичной средней плотностью без наномодификатора.
Notes: * changes for nanomodified high-strength lightweight concrete in relation to the composition with the same average density without nanomodifier.

Таблица 5
Table 5

Состав Composition	Относительные продольные деформации* $\varepsilon_1, \times 10^{-6}$ Relative longitudinal* $\varepsilon_1, \times 10^{-6}$		Относительные поперечные деформации* $\varepsilon_2, \times 10^{-6}$ Transverse deformation (respectively)* $\varepsilon_2, \times 10^{-6}$		Модуль упругости $E, \text{ ГПа}$ Elastic modulus $E, \text{ GPa}$		Коэффициент Пуассона μ Poisson's ratio μ	
1	2163		279		5,55		0,129	
2	2210		314		7,25		0,142	
3	2678		214		7,47		0,08	
4 ^М 4 ^м	2002	-7,4%	233	-16,4%	6	+8%	0,116	-9,7%
5 ^М 5 ^м	2053	-7,1%	278	-11,5%	7,8	+7,6%	0,136	-4,7%
6 ^М 6 ^м	2347	-12,3%	195	-8,6%	8,52	+14,1%	0,083	+4,2%
0	1669		142		19,2		0,085	

Примечание: * ε_1 и ε_2 – при величине нагрузки 30% от разрушающей.
Notes: * ε_1 and ε_2 – at 30% load from breaking value.

разнами, изготовленными с комплексным наноразмерным модификатором. Причина подобного снижения трещиностойкости исключительно арифметическая: имеет место увеличение предела прочности при сжатии наномодифицированного высокопрочного легкого бетона за счет взаимодействия компонентов наномодификатора с цементом и продуктами его гидратации (рис. 1) при сохранении или незначительном увеличении предела прочности при изгибе. Поэтому очевидно, что подобная оценка не может исчерпывающим и адекватным образом характеризовать как трещиностойкость, так и эффективность предложенной методики ее улучшения.

Как показано в табл. 4, предложенный комплексный модификатор, нанесенный на поверхность полых микросфер, выполняя функцию адгезива, увеличивает прочностные показатели высокопрочного легкого бетона на 12–20% независимо от его средней плотности, что связано с увеличением сопротивляемости структуры бетона к формированию и развитию трещин.

Для оценки характеристик разрушения высокопрочного легкого бетона и влияния на них предложенного модификатора выполнены исследования величины деформаций при воздействии 30% разрушающей нагрузки. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 2 и в табл. 5, где показаны графики изменения относительных продольных и поперечных деформаций от приложенной нагрузки.

Из табл. 5 видно, что деформации в продольном и поперечном направлениях у высокопрочного легкого

The interaction of the nanomodifier components with cement and hydration products (Fig. 1) provides to increasing of compressive strength at the constant of the flexural strength. Therefore this parameter can not exhaustively and adequately to characterize the fracture toughness and efficiency of the proposed method to improve it.

The table 4 shows that the proposed complex nanomodifier on the surface of microspheres performing the function of the adhesive increases strength values of high-strength lightweight concrete by 12–20% regardless of its average density. These are due to the increase in resistance of the concrete structure to forming and develop of cracks.

For evaluation of the destruction characteristics of the high-strength lightweight concrete and influence modifier on these properties was performed the research of the deformation values at 30% of the breaking load. The results of experimental research are presented in Fig. 2 and Table 5 where diagrams of the longitudinal and transverse deformations of high-strength lightweight concrete and nanomodified high-strength lightweight concrete are shown.

It can be seen that relative longitudinal and transverse deformations of the high-strength lightweight concrete more than deformations of the fine-grained high-strength heavy concrete at 17–42% and 1.37–2.21 times. This is because the presence of microspheres with low elastic modulus in the structure. The hollow particles destroy

Таблица 6
Table 6

Состав Composition	$R'_{изг}$, МПа R'_{ts} , МПа	$R'_{сж}$, МПа R'_{com} , МПа	$R''_{изг}$, МПа R''_{ts} , МПа	$R''_{сж}$, МПа R''_{com} , МПа	$k_{тр}$ по $R_{сж}$ k_{fl} from R_{com}	$k_{тр}$ по $R_{изг}$ k_{fl} from R_{ts}
1	4,92	44,6	1,42	41	0,919	0,289
2	6,5	48,4	1,75	44,7	0,924	0,269
3	7,04	53,7	1,87	49,3	0,918	0,266
4 ^м 4 ^m	5,28	50,2	2,13	45,7	0,911	0,403
5 ^м 5 ^m	6,07	52,1	2,56	47,2	0,906	0,422
6 ^м 6 ^m	7,31	60,3	3,22	56	0,928	0,44

бетона на 17–42% и в 1,37–2,21 раза больше, чем деформации мелкозернистого высокопрочного тяжелого бетона. Очевидно, что наличие менее плотных компонентов с меньшим модулем упругости, таких как полые микросферы, при возникновении нагрузок будет сопровождаться их разрушением, чем и объясняется существенное отличие величины деформаций высокопрочных легких бетонов. При этом видно, что составы 1 и 4^м со средней плотностью 1290 кг/м³ обладают меньшей величиной продольных и поперечных деформаций, чем составы 2, 3, 5^м, 6^м с большей плотностью. Это подтверждает гипотезу о том, что полые микросферы, являясь естественными дефектами структуры, при увеличении их количества приводят к интенсивному ветвлению трещин, развитие которых в магистральную трещину происходит при больших нагрузках.

Сравнительный анализ данных рис. 2 и табл. 5 показывает, что составы высокопрочного легкого бетона обладают меньшим по сравнению с тяжелым бетоном модулем упругости, а большее значение коэффициента Пуассона для такого бетона свидетельствует о меньшей хрупкости разрушения высокопрочных легких бетонов по сравнению с контрольными составами. Обработка поверхности микросфер модификатором на основе золя гидроксида железа и кремниевой кислоты для приготовления высокопрочных легких бетонов также положительно влияет на снижение деформаций. Упрочнение зоны контакта цементно-минеральной матрицы и порога наполнителя (табл. 3) способствует улучшению сопротивляемости сформированной структуры к деформациям. Составы 4^м, 5^м и 6^м, приготовленные с применением наномодифицированных полых микросфер, имеют на 7–12 и 8,5–16,5% меньшие деформации в продольном и поперечном направлениях к приложенной нагрузке соответственно. Это указывает на повышение модуля упругости высокопрочного легкого бетона на 7,5–14% за счет уплотнения структуры вследствие взаимодействия наномодификатора с продуктами гидратации цемента и образования дополнительных связей в виде гидросиликатов кальция на границе раздела фаз (рис. 1). При этом за счет более интенсивного снижения поперечных деформаций наблюдается снижение коэффициента Пуассона на 5–10% для составов средней плотности 1300 и 1400 кг/м³.

Образование различного рода локальных трещин в процессе эксплуатации, приводящее к снижению прочности, происходит под действием усадки и многих других внешних факторов, поэтому дополнительным критерием для адекватной оценки коэффициента трещиностойкости высокопрочного легкого бетона выбран метод МИИТ [17, 18]. Экспериментальные исследования трещиностойкости по этому методу осуществлялись по показателям прочности при сжатии и изгибе, результаты которых представлены в табл. 6.

Анализ табл. 6 показывает, что возникновение внутренних напряжений (вследствие экстремального изменения эксплуатационных условий: попеременного увлажнения и высушивания), процессы образования и развития трещин в составах наномодифицированного высокопрочного легкого бетона протекают с меньшей интенсивностью. Использование предлагаемого наномодификатора способствует повышению трещиностойкости на 39,4–65,4% при расчете по изменению прочности при изгибе. Показатель трещиностойкости при расчете по изменению прочности при сжатии является неинформативным: изменение не превышает статистической погрешности и составляет 0,8–1,9%.

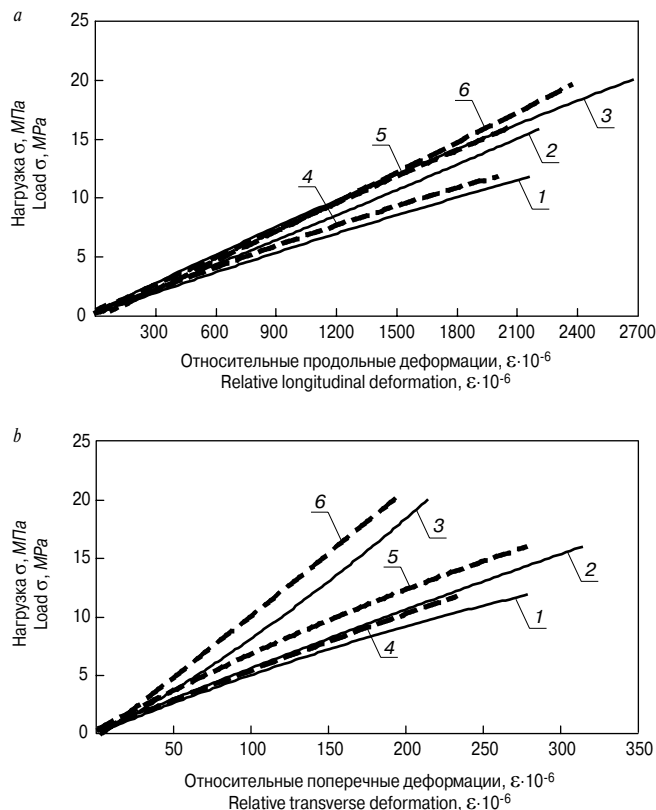


Рис. 2. Диаграммы деформирования в продольном (а) и поперечном (b) направлениях образцов высокопрочных легких бетонов и образцов наномодифицированных высокопрочных легких бетонов: 1 – Состав 1; 2 – Состав 2; 3 – Состав 3; 4 – Состав 4^м; 5 – Состав 5^м; 6 – Состав 6^м
Fig. 2. The diagrams of the longitudinal (a) and transverse (b) deformations of high-strength lightweight concrete and nanomodified high-strength lightweight concrete: 1 – composition 1; 2 – composition 2; 3 – composition 3; 4 – composition 4^m; 5 – composition 5^m; 6 – composition 6^m

when exposed to more low loads. But Composition 1 and Composition 4^m with average density 1290 kg/m³ have a less value of longitudinal and transverse deformations than other composition with higher density. This supports the hypothesis that hollow microspheres are natural structural defects and the increasing of their number provides to intensive branching of the cracks that allows to more resistance to cracking.

The Fig. 2 and Table 5 show that compositions of HSLWC have less elastic modulus than heavy concrete but more values of Poisson's ration. The modifying of the microspheres surface using by nanoscale additive has a positive effect to reduce deformations and fragility fracture of this concrete. The Composition 4^m, 5^m and 6^m prepared with nanomodifier have less relative longitudinal and transverse deformation at 7–12 and 8.5–16.5%

Таким образом, предложенная методика модифицирования поверхности полых микросфер активным по отношению к цементу и продуктам гидратации цемента наномодификатором на основе коллоидных растворов гидроксида железа и кремниевой кислоты является эффективной для снижения величины деформаций при воздействии сжимающих нагрузок за счет упрочнения границы раздела фаз цементный камень – полые микросферы. Однако, как показано выше, недостаточные по сравнению с мелкозернистыми высокопрочными тяжелыми бетонами показатели модуля упругости и коэффициента Пуассона наномодифицированных высокопрочных легких бетонов требуют поиска комбинированных решений, обеспечивающих армирующий и/или демпфирующий эффект, для снижения величины внутренних напряжений при воздействии эксплуатационных нагрузок.

На основании полученных результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

– полые микросферы являются перспективным наполнителем для получения легких бетонов с повышенными эксплуатационными свойствами; увеличение объемной доли сферических микрочастиц в составе бетона способствует формированию плотноупакованной структуры, приводящей к снижению величины деформаций, вызванных интенсивным ветвлением трещин при увеличении нагрузки. Коэффициент трещиностойкости высокопрочных легких бетонов на полых микросферах, оцениваемый по отношению предела прочности при изгибе к пределу прочности при сжатии, сопоставим с показателем мелкозернистых высокопрочных тяжелых бетонов и составляет более 0,1 и ограничивается прочностными характеристиками микрометрических частиц наполнителя;

– предложена методика повышения трещиностойкости высокопрочных легких бетонов на алюмосиликатных микросферах, заключающаяся в создании на поверхности полого заполнителя активной железисто-кремнеземистой оболочки, вступающей во взаимодействие с основными компонентами и продуктами гидратации цемента, упрочняя границу раздела фаз;

– установлены закономерности изменения деформаций высокопрочного легкого бетона от объемного содержания полых микросфер, показано влияние наноразмерного модификатора на модуль упругости и коэффициент Пуассона исследуемых составов. Модифицирование поверхности полых микросфер активным наноразмерным модификатором на основе золя гидроксида железа и кремниевой кислоты для увеличения адгезии на границе раздела фаз способствует снижению продольных и поперечных деформаций высокопрочных легких бетонов на 7–12 и 8,5–16,5% соответственно. Интенсивность трещинообразования высокопрочного легкого бетона при воздействии усадочных напряжений снижается на 56,9% при использовании полых микросфер, аппретированных предложенным наномодификатором;

– повышение показателей модуля упругости и коэффициента Пуассона наномодифицированных высокопрочных легких бетонов до значений, близких к высокопрочным тяжелым бетонам, требует поиска комбинированных решений, обеспечивающих армирующий и/или демпфирующий эффект.

Список литературы

1. Wilson H.S., Malhotra V.M. Development of high strength lightweight concrete for structural applications // *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1988. Vol. 10. Iss. 2, pp. 79–90.
2. Kılıç A., Atiş C.D., Yaşar E., Özcan F. High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate

than without it. It allows to increase a elastic modulus at 7.5–14.1% due to compaction the structure because of the forming additional bonds of calcium hydrosilicates in the phase boundary (Fig. 1). The due to intensive reducing of the transverse deformation than longitudinal deformation the reducing of the Poisson's ration at 5–10% is observed for compositions with average density 1300 and 1400 kg/m³.

The forming the various kinds of local cracks in-service occurs under the effect of shrinkage and many other external factors therefore additional criteria for evaluation of the coefficient of fracture toughness was chosen method MIIT. The results of experiments presented in the table 6 characterize the fracture toughness by the flexure and compressive strength.

The analysis of the table 6 show that the occurrence of internal stresses (due to extreme changes in operating conditions: variable wetting and drying), processes of forming and growth of the cracks into the nanomodified high-strength lightweight concrete occur with less intensity.

The using proposed nanomodifier allows to increase the fracture toughness at 39.4–65.4% through the calculation of flexure strength. The coefficient of fracture toughness through the calculation of compressive strength is not informative – changing of the values is not more of the statistical error (0.8–1.9%).

Thus, the proposed modification method of the surface of the hollow microspheres using by the active to cement and hydration products modifier based on the colloidal solutions of iron hydroxide and silicic acid is effective to reduce of the deformations due to the hardening of the interface boundary cement stone/hollow filler.

However the improvement of the deformation properties by using the nanosized adhesive is inadequate as compared with the values of elastic modulus and Poisson's ratio of the fine-grained high-strength heavy concrete. It takes to find out combined solutions provides to the reinforcement and/or damping effect.

The results of researches in this paper allow to make a follow conclusions: The method of increasing the fracture toughness of high-strength lightweight concrete with aluminosilicate microspheres is proposed. It is to create the active iron-silica shell on the surface of the hollow filler, which interacts with the major components and products of the cement hydration and reinforces the phase boundary. The patterns of changing the deformations of the high-strength lightweight concrete on volume content of the hollow microspheres are researched. The influence of the nanomodifier on the elastic modulus and Poisson's ratio for the studied concrete is shown. The proposed method of modifying allows to reduce the longitudinal and transverse deformations of the high-strength lightweight concrete at 7–12% and 8.5–16.5% respectively. The nanomodifier reduces the intensity of the cracking under the influence of shrinkage stresses of high-strength lightweight concrete by 56.9%.

References

1. Wilson H.S., Malhotra V.M. Development of high strength lightweight concrete for structural applications. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1988. Vol. 10. Iss. 2, pp. 79–90.
2. Kılıç A., Atiş C.D., Yaşar E., Özcan F. High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33. Iss. 10, pp. 1595–1599.

- containing mineral admixtures // *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33, Iss. 10, pp. 1595–1599.
3. Costa H., Júlio E., Lourenço J. New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 35, pp. 84–91.
 4. Korolev E.V., Smirnov V.A. Using particle systems to model the building materials // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 746, pp. 277–280.
 5. Tanyıldızı H. Post-fire behavior of structural lightweight concrete designed by Taguchi method // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68, pp. 565–571.
 6. Ming Kun Y.M., Bin M.H., Chin A.B., Chian Y.M. Effects of heat treatment on oil palm shell coarse aggregates for high strength lightweight concrete // *Materials & Design*. 2014. Vol. 54, pp. 702–707.
 7. Daniel M., Franco Z., Álvaro P., Mauricio L. High strength lightweight concrete (HSLC): Challenges when moving from the laboratory to the field // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56, pp. 44–52.
 8. Kockal N.U., Ozturan T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes // *Materials & Design*. 2011. Vol. 32 (4), pp. 2396–2403.
 9. Sajedi F., Shafiq P. High-strength lightweight concrete using leca, silica fume, and limestone // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2012. Vol. 37. No. 7, pp. 1885–1893.
 10. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Полые микросферы – эффективный заполнитель для высокопрочных легких бетонов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. № 10. С. 80–83.
 11. Орешкин Д.В., Семенов В.С., Розовская Т.А. Облегченные тампонажные растворы с противоморозными добавками для условий многолетнемерзлых пород // *Нефтяное хозяйство*. 2014. № 4. С. 42–45.
 12. Орешкин Д.В. Эффективные облегченные тампонажные растворы для условий аномально низких пластовых давлений и многолетнемерзлых пород // *Нефтяное хозяйство*. 2008. № 1. С. 50–53.
 13. Semenov V., Rozovskaya T., Oreshkin D. Properties of the dry masonry mixtures with hollow ceramics microspheres // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 860–863, pp. 1244–1247.
 14. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 6. С. 25–33.
 15. Inozemtcev A.S. High-strength lightweight concrete mixtures based on hollow microspheres: technological features and industrial experience of preparation // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 71 (1). <http://iopscience.iop.org/1757-899X/71/1/012028> Open access.
 16. Иноземцев А.С. Средняя плотность и пористость высокопрочных легких бетонов // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 7 (51). С. 31–37.
 17. Лещинский М.Ю. Испытание бетонов. М.: Стройиздат, 1980. 360 с.
 18. Шейкин А.Е. О структуре и трещиностойкости бетонов // *Бетон и железобетон*. 1972. № 10. С. 18–20.
 19. Гришина А.Н., Королев Е.В. Эффективная наноразмерная добавка, повышающая устойчивость пен для пенобетонов // *Вестник МГСУ*. 2012. № 10. С. 159–165.
 20. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Структурообразование и свойства конструкционных высокопрочных легких бетонов с применением наномодификатора BisNanoActivus // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 33–37.
 3. Costa H., Júlio E., Lourenço J. New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 35, pp. 84–91.
 4. Korolev E.V., Smirnov V.A. Using particle systems to model the building materials. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 746, pp. 277–280.
 5. Tanyıldızı H. Post-fire behavior of structural lightweight concrete designed by Taguchi method. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68, pp. 565–571.
 6. Ming Kun Y.M., Bin M.H., Chin A.B., Chian Y.M. Effects of heat treatment on oil palm shell coarse aggregates for high strength lightweight concrete. *Materials & Design*. 2014. Vol. 54, pp. 702–707.
 7. Daniel M., Franco Z., Alvaro P., Mauricio L. High strength lightweight concrete (HSLC): Challenges when moving from the laboratory to the field. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56, pp. 44–52.
 8. Kockal N.U., Ozturan T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32 (4), pp. 2396–2403.
 9. Sajedi F., Shafiq P. High-Strength Lightweight Concrete Using Leca, Silica Fume, and Limestone. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2012. Vol. 37. No. 7, pp. 1885–1893.
 10. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Hollow microspheres is an efficient filler for high-strength lightweight concrete. *Промышленное и гражданское строител'ство*. 2013. No. 10, pp. 80–83. (In Russian).
 11. Oreshkin D.V., Semenov V.S., Rozovskaya T.A. Light-weight backfill mortars with antifreeze additives for the permafrost conditions. *Нефтяное хозяйство*. 2014. Vol. 4, pp. 42–45. (In Russian).
 12. Oreshkin D.V. Effective lightweight tamping solutions for the conditions of abnormally low reservoir pressures and permafrost. *Нефтяное хозяйство*. 2008. No. 1, pp. 50–53. (In Russian).
 13. Semenov V., Rozovskaya T., Oreshkin D. Properties of the dry masonry mixtures with hollow ceramics microspheres. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 860–863, pp. 1244–1247.
 14. Ponomarev A.N. High quality concrete. Analysis of the opportunities and the practice of using nanotechnology methods. *Инженерно-строител'nyi zhurnal*. 2009. No. 6, pp. 25–33. (In Russian).
 15. Inozemtcev A.S. High-strength lightweight concrete mixtures based on hollow microspheres: technological features and industrial experience of preparation. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 71 (1). <http://iopscience.iop.org/1757-899X/71/1/012028> Open access.
 16. Inozemtcev A.S. Average density and porosity of high-strength lightweight concrete. *Инженерно-строител'nyi zhurnal*. 2014. No. 7 (51), pp. 31–37. (In Russian).
 17. Leshchinskii M.Yu. Ispytanie betonov [Test of the concrete]. Moscow: Stroizdat. 1980. 360 p.
 18. Sheikin A.E. On the structure and fracture of concrete. *Бетон и zhelezobeton*. 1972. No. 10, pp. 18–20. (In Russian).
 19. Grishina A.N., Korolev E.V. Efficient nano-scale admixture for foam stability improvement of cellular concretes. *Vestnik MGSU*. 2012. No. 10, pp. 159–165. (In Russian).
 20. Inozemtcev A.S., Korolev E.V. Structuring and properties of the structural high-strength lightweight concretes with nanomodifier BisNanoActivus. *Строител'nye Materialy* [Construction Materials]. No. 1–2, pp. 33–37. (In Russian).

СПЕЦИАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО
СКБ СТРОЙПРИБОР
ПРИБОРЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ



тел/факс в Челябинске:
 (351) 790-16-13, 790-16-85, 796-64-14
 в Москве: (495) 964-95-63, 220-38-58
 e-mail: stroypribor@chel.surnet.ru
 www.stroypribor.ru

ИЗМЕРИТЕЛИ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА, КИРПИЧА

ИПС-МГ4.01 / ИПС-МГ4.03
 ударно-импульсный

автоматическая обработка
 измерений



диапазон 3...100 МПа

УКС-МГ4 / УКС-МГ4 С
 ультразвуковой

поверхностное и сквозное
 прозвучивание



частота 60...70 кГц
 диапазон 10...2000 мкс

ПОС-50МГ4 / ПОС-50МГ4 Д /
ПОС-50МГ4 "Скол"

отрыв со скалыванием
 и скалывание ребра



предельное
 усилие 60 кН
 диапазон 5...100 МПа

ПОС-2МГ4 П

испытание прочности
 ячеистых бетонов



предельное
 усилие вырыва 2,5 кН

ПЛОТНОМЕРЫ ГРУНТОВ
ДИНАМИЧЕСКИЕ

ПДУ-МГ4 "Удар"
 и ПДУ-МГ4 "Импульс"

определение динамического
 модуля упругости грунтов
 и оснований дорог
 методом штампа,
 диапазон: 5...370 МН/м² ("Удар")
 5...300 МН/м² ("Импульс")



Прессы испытательные
 малогабаритные

ПГМ-100МГ4 / ПГМ-500МГ4
/ ПГМ-1000МГ4

с гидравлическим приводом
 для испытания бетона,
 асфальтобетона, кирпича
 ■ предельная нагрузка
 100 / 500 / 1000 кН
 ■ масса 70 / 120 / 180 кг



ПМ-1МГ4 / ПМ-2МГ4 / ПМ-3МГ4
/ ПМ-5МГ4 / ПМ-10МГ4

с ручным / электрическим приводом
 для испытания утеплителей на изгиб
 и сжатие при 10% линейной деформации
 ■ предельная нагрузка 1 / 2 / 3 / 5 / 10 кН
 ■ масса 20 / 25 кг

ПСО-10МГ4 КЛ

испытание прочности
 сцепления в каменной
 кладке



предельное усилие
 отрыва 15 кН

АДГЕЗИМЕТРЫ

ПСО-МГ4

испытание прочности
 сцепления покрытия
 с основанием



предельная нагрузка
 1 / 2,5 / 5 / 10 кН

ИЗМЕРИТЕЛИ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

ИТП-МГ4 "100" / "250" / "Зонд"

стационарный
 и зондовый режимы



диапазон 0,02...1,5 Вт/м·К

АНЕМОМЕТРЫ, ГИГРОМЕТРЫ

ИСП-МГ4 / ИСП-МГ4.01
 анемометр-термометр

диапазон 0,1...20 (1...30) м/с
 -30...+100 °С



ТГЦ-МГ4 / ТГЦ-МГ4.01
 термогигрометр

диапазон 0...99,9 % / -30...+85 °С



ИЗМЕРИТЕЛИ ПЛОТНОСТИ
ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ТЕМПЕРАТУРЫ

ИТП-МГ4.03 "Поток"

3...5, 10 и 100-канальные
 регистраторы



диапазон 10...999 Вт/м²
 -40...+70 °С

ИЗМЕРИТЕЛИ ВЛАЖНОСТИ

ВЛАГОМЕР-МГ4

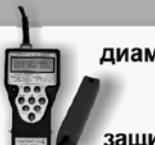
для измерения влажности
 бетона,
 сыпучих,
 древесины
 диапазон 1...45 %



ИЗМЕРИТЕЛИ ТОЛЩИНЫ
ЗАЩИТНОГО СЛОЯ БЕТОНА

ИПА-МГ4

диаметр контролируемой
 арматуры 3...40 мм
 диапазон измерения
 защитного слоя 3...140 мм



ТЕРМОМЕТРЫ

ТМР-МГ4 / ТЦЗ-МГ4 / ТЦЗ-МГ4.01

модульные регистрирующие
 для зимнего бетонирования
 и пропарочных камер
 (до 20 модулей в комплекте)
 зондовые / контактные
 1...2-канальные
 диапазон -40...+100 / 250 °С



ИЗМЕРИТЕЛИ СИЛЫ НАТЯЖЕНИЯ
АРМАТУРЫ

ДО-40 / 60 / 80МГ4

метод поперечной оттяжки

диапазон контролируемых
 усилий 2...120 кН



диаметр
 арматуры 3...12 мм

ИЗМЕРИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЙ
В АРМАТУРЕ

ЭИН-МГ4

частотный метод

диаметр
 арматуры 3...32 мм



диапазон 100...1800 МПа

ПРОИЗВОДИМ: ИЗМЕРИТЕЛИ ВИБРАЦИИ, МОРОЗОСТОЙКОСТИ, ТОЛЩИНОМЕРЫ, ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ ВЕСЫ И ДР.

Реклама

УДК 691.328.43

М. САБЕР¹, Assistant Lecturer (Eng.m.saber@hotmail.com); К.А. САРАЙКИНА², магистр (Ksenya_s2004@mail.ru); Г.И. ЯКОВЛЕВ³, д-р техн. наук (jakowlew@udm.net); А. ШЕРИФ¹, Professor of Concrete Structures and Vice Dean of Faculty of Engineering – Helwan University (agbsherif@yahoo.com), С. АБД ЭЛЬНАБИ¹, Professor of Materials (sherifsens@yahoo.com), Ш. ХЕЛМИ¹, Professor of Concrete Structures (president@eruegypt.com)

¹ Egyptian Russian University (Cairo-Suez road, Badr City, 11829, Egypt)

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

³ Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова (426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7)

Прочность при сдвиге армированного базальтопластиком (АБП) бетона

Применение армированных волокнами полимеров в строительстве стало важной темой исследований. Армированные полимеры имеют много преимуществ, таких как высокая прочность на растяжение, коррозионная стойкость, малый вес и непроводимость. Эта работа представляет собой экспериментальное исследование поведения армированного базальтопластиком (БП) бетона на прямой сдвиг посредством изучения образцов сдвига. Основная цель исследования заключается в сравнении поведения S-образных бетонных образцов сдвига, армированных стержнями из обычной мягкой стали или базальтопластика с контрольными образцами. Были отлиты и исследованы двенадцать образцов под воздействием сжимающих сил. Они были разделены на четыре группы, различающиеся по типу и основной арматуре. На основании полученных результатов уравнения, используемые для прогнозирования мощности сдвига железобетона, были изменены в соответствии с пониженной жесткостью БП.

Ключевые слова: базальтопластик, армирование, бетон, прочность, сдвиг.

M. SABER¹, Assistant Lecturer (Eng.m.saber@hotmail.com); K. SARAYKINA², Master (Ksenya_s2004@mail.ru); G. YAKOVLEV³, Doctor of Sciences (Engineering) (jakowlew@udm.net); A. SHERIF¹, Professor of Concrete Structures and Vice Dean of Faculty of Engineering – Helwan University (agbsherif@yahoo.com), S. ABD ELNABY¹, Professor of Materials (sherifsens@yahoo.com), S. HELMY¹, Professor of Concrete Structures (president@eruegypt.com)

¹ Egyptian Russian University (Cairo-Suez road, Badr City, 11829, Egypt)

² Perm State National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy Avenue, Perm, 614990, Russian Federation)

³ Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov (7, Studencheskaya Street, Izhevsk, 426069, Russian Federation)

Shear strength of concrete reinforced with basalt fiber reinforced polymer bars (BFRP)

The application of fiber reinforced polymers in construction became an important research topic in construction. Reinforced polymers have many advantages such as high tensile strength, corrosion resistance, light weight and non conductivity. This study presents an experimental investigation into the direct shear behavior of concrete, reinforced using basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars, by testing Push-off specimens. The main objective of the study is to compare the behavior of concrete S-shaped push-off specimens reinforced using ordinary mild steel bars or BFRP bars to the plain control specimens. Twelve specimens were molded and tested under compression force. They were divided into four groups differing in the type and detailing of their main reinforcement. Based on the obtained results, the equations used to predict the shear capacity of reinforced concrete were modified to suit the reduced stiffness of the BFRP.

Keywords: basalt fiber reinforced polymer, concrete, strength, shift.

Коррозию стальной арматуры в бетоне можно предотвратить множеством способов, в том числе эпоксидным покрытием, цинкованием, катодной защитой или спецификацией арматуры из нержавеющей стали. Современная тенденция направлена на применение в бетоне армированных волокном полимеров (АВП), поскольку они имеют легкий вес, являются коррозионностойкими и электрически проводящими материалами [1]. Основная проблема использования АВП арматуры заключается в том, что прочность арматуры в продольном направлении зависит от прочности волокнистых материалов, а в поперечном – от прочности матрицы (полимера). Это приводит к снижению сопротивления АВП напряжениям сдвига в железобетонных элементах. Данное исследование проводилось для подтверждения эффективности использования базальтопластика (БП) в качестве арматуры для железобетонных элементов по сравнению с традиционной стальной арматурой.

Проводилось сравнение эффективности БП и стальной арматуры сопротивлению напряжению сдвига в железобетонных элементах. Для этого используется S-образный образец сдвига [1–3]. Он состоит из бетонной призмы с двумя углублениями, проходящими перпендикулярно ее продольной оси и создающими плоскость, находящуюся под действием напряжений сдвига при сжатии образца. Проводится сравнение по-

The corrosion of steel bars in concrete could be resisted using many ways as epoxy-coating, galvanizing, cathodic protection or specification of stainless steel bars. The modern trend focuses on the application of fiber reinforced polymers (FRPs) in concrete because they are noncorrosive, light weight and electrically non conducting materials [1]. The main problem of using (FRPs) bars is that the bars' strength in the longitudinal direction depends on the fiber materials strength while the strength in the transverse direction depends on the matrix (polymer) strength. This results in inefficiency of FRPs bars in resisting shear stresses in reinforced concrete elements. The current study investigates the efficiency of using basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars as reinforcement in reinforced concrete elements compared to traditional steel bars.

The current research aims to compare the efficiency of (BFRP) bars with that of steel bars in resisting shear stress in reinforced concrete elements. For this purpose, the S-shaped push-off test specimen is used [1–3]. It consists of a concrete prism containing two recesses perpendicular to its longitudinal axis, resulting in a plane that is subjected to pure shear stresses, when the specimen is subjected to compression. The behavior of specimens containing different types and contents of reinforcement is compared to that of plain concrete specimens. The results are used to modify the equations [4] used to predict the shear capacity of reinforced concrete to account for bars with low modulus of elasticity.

ведения образцов с арматурой разных типов и материалов с обычными бетонными образцами. Полученные результаты используются для модификации уравнений [4], применяемых для прогнозирования мощности сдвига железобетона с арматурой с низким модулем упругости.

Прочность на сжатие бетона, используемого в отливке образцов, составляла 25 МПа. Составляющие смеси (по весу): 1 часть – портландцемент (Sinai Portland cement); 2,5 части – мелкий заполнитель (песок); 4 части – крупный заполнитель (дробленый доломит) и 0,5 части пресной воды. Используемая арматура представляла собой стальные стержни диаметром 8 мм, изготовленные из высококачественной стали с нижним пределом текучести 390 МПа. Предел прочности базальтопластика составляет 133 МПа, а его модуль упругости – 46 ГПа. Диаметр применяемой БП арматуры был 6 и 8 мм.

Испытания проводились с использованием двенадцати образцов с одинаковыми размерами и основной арматурой, но разной плоскостью сдвига. На рис. 1 показаны размеры и данные по основной и поперечной арматуре. Образцы были разделены на четыре группы. Первая группа была контрольной без поперечной арматуры, проходящей через плоскость сдвига. Вторая группа была армирована двумя рядами стальных стержней. Каждый ряд состоял из трех стержней диаметром 8 мм. Третья группа была армирована двумя рядами БП арматуры, каждый из которых состоял из трех стержней диаметром 6 мм. Четвертая группа имела арматуру, аналогичную третьей группе, но диаметр стержней составлял 8 мм.

Основная арматура образца очень важна для получения требуемого вида разрушения в плоскости сдвига. Основная арматура, показанная на рис. 1, была выбрана с целью предотвращения нежелательных разрушений. На рис. 2 показаны образцы до и после укладки.

Испытание образцов проводилось в Испытательной лаборатории бетона инженерного факультета Египетского-Российского университета с помощью испытательной рамы. Максимальная производительность загрузочной рамы составляет 1000 кН, а скорость загрузки – 0,5 кН/с. Загрузка и деформации контролировались с помощью регистратора данных, подключенного к компьютеру.

На рис. 3 показаны виды разрушений для четырех групп образцов. Как видно, все образцы претерпели разрушения в виде трещин в плоскости сдвига.

На рис. 4 представлены типичные состояния арматуры в плоскости сдвига после разрушения. В группах 2 и 4 бетон был убран с целью изучения арматуры.

Видно, что стальные стержни сместились и местами погнулись; БП арматура диаметром 6 мм разрушилась, в то время как БП арматура диаметром 8 мм утратила жесткость при изгибе без разрушения, а также сохранила осевую жесткость, поскольку волокна остались неповрежденными. Это обеспечило восстановление боль-

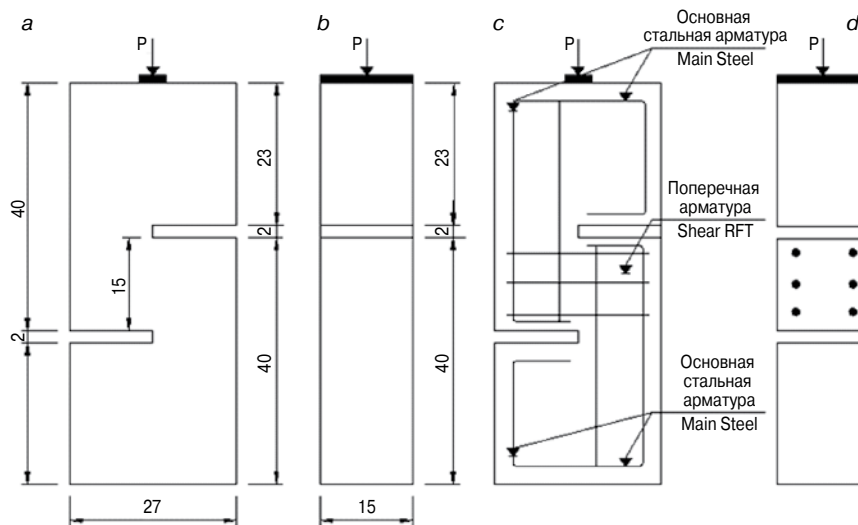


Рис. 1. S-образные образцы сдвига: а – вертикальная проекция; б – боковая проекция; с – основная арматура; д – поперечное сечение А-А (все размеры даны в см)

Fig. 1. S-shaped push-off specimen details: а – front view; б – side view; с – main reinforcement details; д – cross-section A-A; (All dimensions are in sm)



Рис. 2. Образцы до и после укладки

Fig. 2. The Specimens before and after casting

The compressive strength of concrete used in molding the Push-off samples was 25 MPa. The constituents of the mix, by weight were 1 unit of Portland cement (Sinai Portland cement), 2.5 units of fine aggregate (sand), and 4 units of coarse aggregate (crushed dolomite) and 0.5 unit of fresh water. The used steel bars were 8 mm diameter high grade steel deformed bars with 390 MPa yield strength. The ultimate strength of the basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars equals to 133 MPa and its modulus of elasticity equals to 46 GPa. The diameters of the used (BFRP) bars were 6 mm and 8 mm.

The experimental program contained twelve specimens with the same dimensions and same main reinforcement, but they had different shear plane reinforcement. Figure 1 shows the specimen's dimensions and the main and shear reinforcement details. The specimens were divided in four groups. The first group was a control group with no shear reinforcement passing through the shear plane. The second group was reinforced with two rows of steel bars. Every row contained three 8 mm diameter bars. The third group was reinforced with two rows of (BFRP) bars, each containing three 6 mm diameter bars. The fourth group was reinforced similar to the third group, but the diameter of the bars was 8 mm.

The main reinforcement of the specimen is very important to ensure obtaining the required failure mode through the shear plane. The main reinforcement detailing shown in Fig. 1 was chosen to prevent undesirable failure modes. Fig. 2 shows the specimens before and after casting.

The testing of the samples was performed in the Concrete Testing Laboratory of the Faculty of Engineering of the

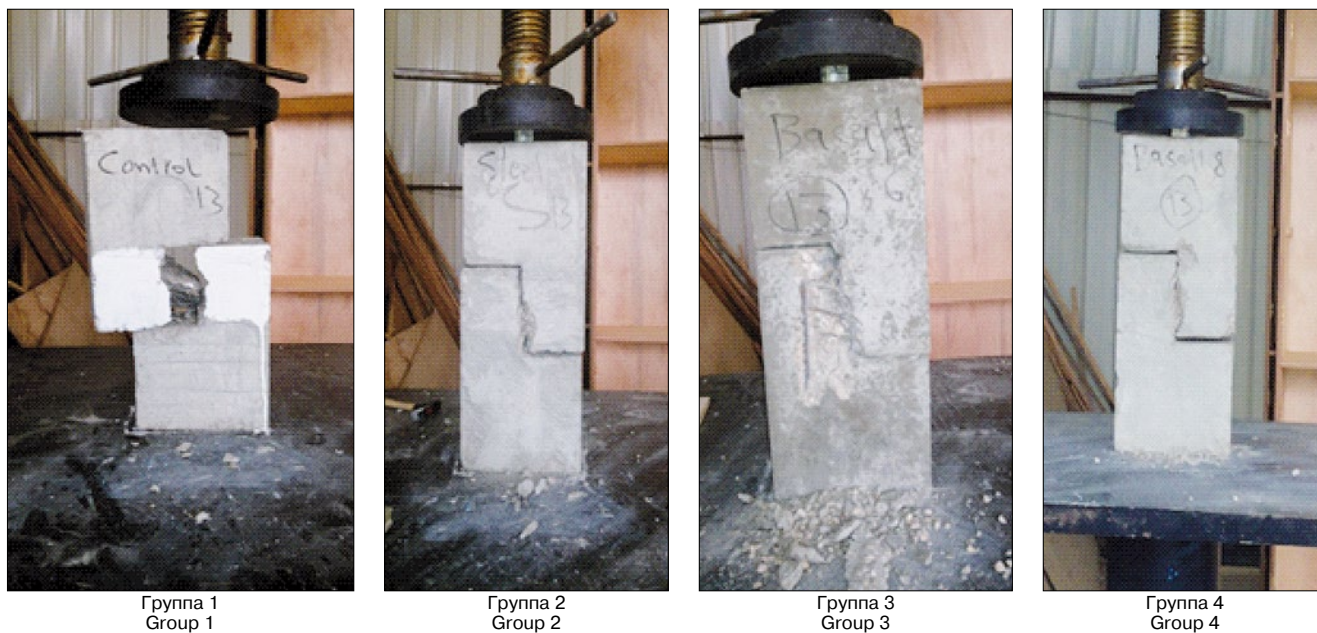


Рис. 3. Типичные виды разрушений

Fig. 3. Typical failure modes



Рис. 4. Плоскость сдвига после разрушения

Fig. 4. Shear plane after failure

шинства деформаций после снятия нагрузки. БП арматура диаметром 6 мм претерпела сгибание без возможности восстановления в плоскости сдвига за счет локального повреждения эпоксидной матрицы арматуры. Тем не менее сами по себе базальтовые волокна остались частично нетронутыми и могли способствовать развитию усилий растяжения, необходимых для сцепления заполнителей.

В таблице представлены максимальные разрушающие нагрузки и соответствующие максимальные смещения для всех образцов.

Как видно, разрушающие нагрузки составляли от 54 кН для контрольных образцов до 212 кН для образцов, армированных БП арматурой 8 мм.

Средняя мощность сдвига образцов группы 2 и 4 составляет 138 и 182 кН соответственно. Это означает, что при условии использования одного и того же диаметра стержней более эффективным представляется армирование плоскости сдвига БП арматурой, чем стальной. Это может быть обусловлено более низкой поперечной жесткостью БП арматуры, которая является более со-

Egyptian Russian University using the testing frame. The maximum capacity of the loading frame is 1000 кН and the loading rate was 0.5 кН/second. The load and deformation were monitored using a data logger connected to a computer.

Figure 3 shows the modes of failure for the four specimen groups. It can be seen that all specimens failed by developing cracks through the shear plane.

Figure 4 shows typical conditions of the bars passing the shear plane after failure. The concrete cover for Group 2 and Group 4 was intentionally removed to reveal the bars.

It can be seen that the steel bars yielded and were locally bent; the 6 mm BFRP bars were fractured, while the 8 mm BFRP bars lost their bending stiffness without fracture. The latter bars maintained their axial stiffness because the fibers remained undamaged. This ensured the retrieval of most of the deformations after removal of the load. The 6 mm BFRP bars were permanently bent at the shear plane due to local damage of the epoxy matrix of the bars; however, the basalt fibers themselves remained partially intact and could contribute to the development of the tensile forces necessary for the aggregates interlocking action to occur.

вместимой с поперечной жесткостью бетона, что приводит к снижению концентрации напряжения по периметру и длине арматуры.

На рис. 5 показаны кривые зависимости деформаций от нагрузок испытанных образцов. Для образцов группы 1 характерна хрупкость из-за внезапной потери нагрузки при разрушении. Образцы группы 2 имеют нисходящую ветвь кривой, указывающую на частично пластичные разрушения. Образцы группы 3 и 4 демонстрируют слегка нисходящую ветвь, указывающую на квази-пластичные разрушения.

На рис. 6 показан образец, армированный БП арматурой диаметром 8 мм в условиях нагрузки и ее снятия. Хорошо видно, что значительная часть деформации сместилась во время разгрузки. Это означает, что БП арматура при сдвиге остается упругой при условии, что стержневая арматура остается неповрежденной.

Для расчета прочности на сдвиг используемых образцов могут быть использованы две модели. Первая модель – модель трения при сдвиге и вторая – модель связности и трения [4]. Изучается применимость двух моделей при расчете экспериментально полученной прочности на сдвиг.

Модель трения при сдвиге. Простейшей расчетной моделью мощности сдвига является модель трения при сдвиге, которая игнорирует мощность сдвига, присущую обычному бетону, и предполагает, что передача усилий сдвига происходит полностью из-за трения. Эта модель является основой проектирования трения при сдвиге в стандартах АСІ 318 [5] и ЕСР 203 [6]. Мощность сдвига рассчитывается по формуле 1 [4]:

$$V_n = A_v \cdot f_y \cdot \mu, \quad (1)$$

где A_v определяется как площадь арматуры, пересекающей плоскость сдвига; f_y – максимальное напряжение текучести арматуры; μ – коэффициент трения. Для особо тяжелого бетона этот коэффициент составляет 1,4 по стандарту АСІ 318 [5] или 1,2 по стандарту ЕСР 203 [6].

При средних значениях мощности сдвига образцов групп 2, 3 и 4, которые составляют 138, 123 и 182 кН соответственно, полученные коэффициенты трения составляют соответственно 1,18, 0,55 и 0,45. Значение для армированных сталью образцов близко к значению в стандарте ЕСР 203, в то время как значения для БП арматуры значительно отличаются от рекомендованных стандартом. Это происходит по причине того, что модуль упругости БП отличается от того же модуля стали. Осевая и изгибная жесткость БП арматуры меньше, чем у стали. Эта гибкость снижает влияние сцепления заполнителя и функции штырей на прочность сдвига. Механизм сцепления заполнителя зависит от осевой жесткости арматуры, а механизм действия штырей зависит от относительной жесткости при изгибе арматуры в качестве балки на упругой опоре.

Поправочный коэффициент для влияния сцепления заполнителя на мощность сдвига будет E_b/E_s , где E_b – модуль упругости материала арматуры, а E_s – мо-

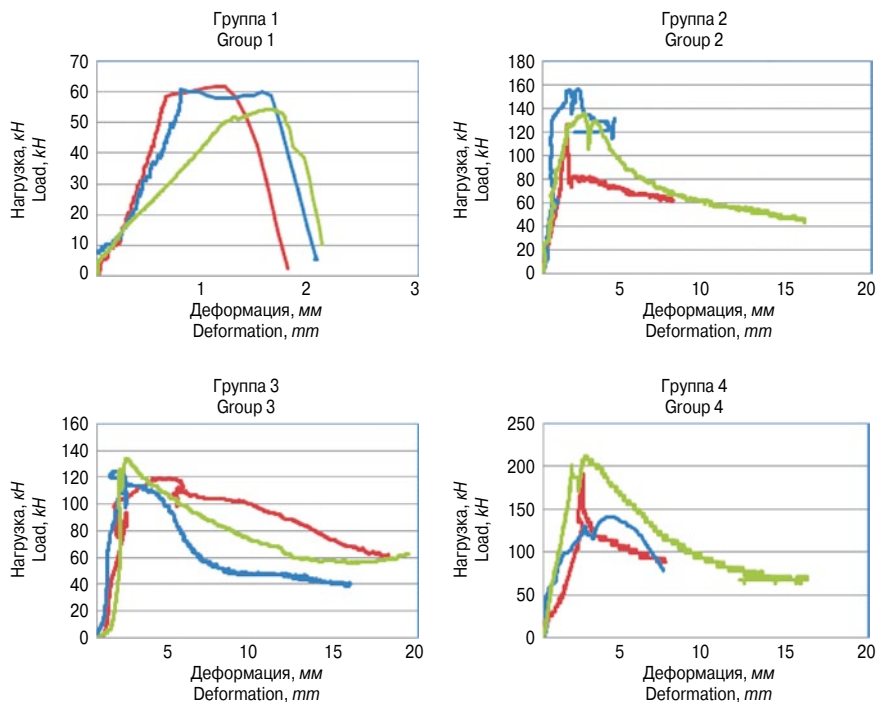


Рис. 5. Кривые нагрузка-деформация
Fig. 5. Load-deformation curves

Образцы Specimens	Поперечная арматура Shear Rft.	Максимальная разрушающая нагрузка, кН Max. Failure Load (kN)	Деформация при нагрузке, мм Deformation at failure (mm)
Контрольный-1 Control-1	Нет No	62	1,19
Контрольный-2 Control-2	Нет No	61	0,8
Контрольный-3 Control-3	Нет No	54	1,16
Сталь-8-1 Steel-8-1	6∅8 мм 6∅8 mm	154	2,25
Сталь-8-2 Steel-8-2	6∅8 мм 6∅8 mm	135	2,59
Сталь-8-3 Steel-8-3	6∅8 мм 6∅8 mm	125	1,87
Базальт-6-1 Basalt-6-1	6∅6 мм 6∅6 mm	132	1,75
Базальт-6-2 Basalt-6-2	6∅6 мм 6∅6 mm	123	1,11
Базальт-6-3 Basalt-6-3	6∅6 мм 6∅6 mm	115	3,17
Базальт-8-1 Basalt-8-1	6∅8 мм 6∅8 mm	212	2,42
Базальт-8-2 Basalt-8-2	6∅8 мм 6∅8 mm	193	2,05
Базальт-8-3 Basalt-8-3	6∅8 мм 6∅8 mm	140	3,8

Table shows maximum failure loads and the corresponding maximum displacements of all specimens.

It can be seen that the failure loads of the specimens ranged from 54 kN for control specimens to 212 kN for specimens reinforced with 8 mm (BFRP) bars.



Рис. 6. Смещение деформации базальтового образца диаметром 8 мм: а – при нагрузке; б – при разгрузке

Fig. 6. Deformation removal of 8 mm basalt specimen: a – during loading; b – during unloading

дуль упругости стали. Поправочный коэффициент для влияния штырей на прочность сдвига будет $(E_b/E_s)^{1/4}$ [7].

Для БП эти поправочные коэффициенты составляют $46/200=0,23$ и $(0,23)^{1/4}=0,69$ соответственно. Ни один из этих коэффициентов не соответствует экспериментальным значениям 0,46 и 0,375 для групп 3 и 4. Это можно объяснить тем фактом, что передача усилий сдвига не осуществляется полностью ни сцеплением заполнителя, ни действием штырей. Предполагается, что поправочный коэффициент будет между этими двумя предельными значениями.

Различные стандарты используют различные поправочные коэффициенты для расчета влияния модуля упругости АВП. Стандарт ACI 440.1R-03 [9] использует поправочный коэффициент E_b/E_s , однако, от него отказались в ACI 440.1R-06 [10]. Стандарты ACAN/CSA (2004) [10], JSCE 1997 [11] и Fib Report 40 [12] рекомендуют поправочный коэффициент $(E_b/E_s)^{1/3}$. Итальянский национальный стандарт проектирования CNR-DT 203/2006 [13] и ISIS M03 Manual [14] используют поправочный коэффициент $(E_b/E_s)^{1/2}$. Наконец, Xu и Reinhardt [15] поддерживают использование $(E_b/E_s)^{1/2}$ на основе механики разрушения.

Значения $(E_b/E_s)^{1/3}$ и $(E_b/E_s)^{1/2}$ для БП составляют 61 и 0,48 соответственно. Следовательно, поправочный коэффициент $(E_b/E_s)^{1/2}$ более соответствует данным экспериментальным результатам.

Модель связности и трения [4]. При учете влияния напряжения сдвига, присущего обычному бетону, мощность сдвига может быть рассчитана по уравнению Маттока [16]:

$$V_n = k_1 A_{cv} + 0,8 A_{vf} f_y, \quad (2)$$

где $k_1=400$ psi (2,75 МПа) для обычного тяжелого бетона. Первый член правой части уравнения (2) представляет собой мощность сдвига, присущую обычному бетону, и относится к связности. Второй член представляет собой влияние арматуры и относится к трению. Последний член следует изменять с использованием

The average shear capacity of Group 2 and Group 4 specimens is 138 kN and 182 kN, respectively. This means that, for the same bar diameter, reinforcing the shear plane with BFRP bars is more efficient than using steel bars. This may be due to the lower lateral stiffness of the BFRP bar which is more compatible with that of concrete, resulting in reduced stress concentration around the bars' perimeter and along its length.

Figure 5 shows the load deformation curves of the tested specimens. The specimens of Group 1 show brittle behavior due to their sudden loss of load at failure. The specimens of Group 2 show a descending branch in their load deformation curves indicating a semi ductile failure. The specimens of Group 3 and Group 4 show a lightly descending branch in their load deformation curves indicating a quasi ductile failure.

Figure 6 shows a sample reinforced with 8 mm BFRP bars during loading and during load removal. It can be clearly seen that a considerable portion of the deformation has been removed during unloading. This means that the shear behavior for BFRP bars remains elastic, provided that the reinforcement bars are not fractured.

Two models can be used to predict shear strength of the used specimens. The first model is the Shear Friction Model [4] and the second is the Cohesion Plus Friction Model [4]. The applicability of the two models in predicting the experimentally obtained shear strength is investigated.

Shear Friction Model The simplest design model for shear capacity is the shear-friction model, which ignores the contribution of the inherent shear strength of plain concrete, and assumes that the shear transfer is due entirely to friction. This model is the basis of the shear-friction design procedures in ACI 318 [5] and ECP 203 [6] Codes. The shear capacity is predicted using equation (1) [4].

$$V_n = A_v \cdot f_y \cdot \mu, \quad (1)$$

where: A_v is defined as the area of bars crossing the shear plane; f_y is the maximum yield strength of the bars and μ is the coefficient of friction. For monolithically placed normal weight concrete the latter coefficient takes the value 1.4 given by ACI 318 Code [5] or 1.2 given by ECP 203 Code [6].

Using the average values for the shear capacity of the specimens of Groups 2, 3 and 4, which are 138, 123 and 182 kN respectively, the resulting coefficients of friction are 1.18, 0.55 and 0.45 respectively. The value for the steel reinforced specimens is near the value given by ECP 203 Code, while the values for the BFRP bars are far from that recommended by the Code. This is because the modulus of elasticity of BFRP differs from that of steel. The axial and bending stiffness of the BFRP bars is less than that of steel. This flexibility reduces the aggregate interlock contribution and the dowel action contribution to the shear strength. The aggregate interlock mechanism depends on the axial stiffness of the bars, while the dowel action mechanism depends on the relative flexural stiffness of the bar as a beam on elastic support.

A correction factor for the aggregate interlock contribution to the shear strength would be E_b/E_s where E_b is the modulus of elasticity of the reinforcement bar's material and E_s is that of steel. A correction factor for the dowel action contribution to the shear strength would be $(E_b/E_s)^{1/4}$ [7].

For BFRP, these correction factors are equal to $46/200=0.23$ and $(0.23)^{1/4} = 0.69$ respectively. Neither of these correction factors matches the experimental values

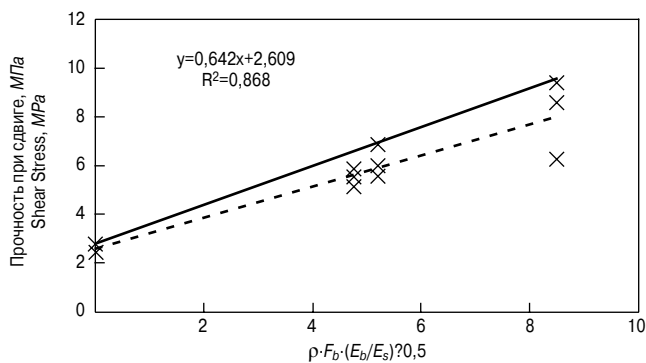


Рис. 7. Влияние арматуры на прочность при сдвиге
Fig. 7. Effect of reinforcement on shear strength

коэффициента $(E_b/E_s)^{1/2}$ для расчета малой жесткости БП.

Таким образом, уравнение (2) может быть преобразовано в уравнение прочности сдвига (МПа) БП арматуры:

$$v_n = 2.75 + 0,8 \cdot \rho \cdot F_b \cdot (E_b/E_s)^{1/2}, \quad (3)$$

где ρ — отношение площади поперечного сечения арматуры к площади сдвига; F_b — технический предел упругости материала арматуры; E_b — модуль упругости материала арматуры; E_s — модуль упругости стали.

На рис. 7 представлены расчеты прочности при сдвиге, полученные с помощью уравнения (3) с экспериментальными результатами. Сплошная линия представляет собой уравнение (3), в то время как пунктирная линия представляет прямую линию, которая лучше всего подходит для современных экспериментальных результатов. Видно, что уравнение (3) образует верхнюю границу результатов. Коэффициенты, полученные с помощью регрессионного анализа, составляют 2,61 и 0,64 вместо 2,75 и 0,8 соответственно. Это указывает на то, что предлагаемая форма уравнения (3) является подходящей для расчета прочности при сдвиге бетона, армированного любым материалом. Для точного определения коэффициентов уравнения необходимы дальнейшие испытания.

Заключение

На основе результатов испытаний можно сделать следующие выводы:

- контрольным образцам свойственны хрупкость и малые деформации при разрушении;
- образцам, армированным стальными стержнями диаметром 8 мм, не свойственна хрупкость. Они претерпели разрушения после сильных деформаций и значительных нагрузок;
- образцам, армированным БП стержнями диаметром 6 мм, не свойственна хрупкость. Они разрушились после проявления средних деформаций, но нагрузка была ниже, чем на образцы со стальной арматурой;
- образцам, армированным БП стержнями диаметром 8 мм, не свойственна хрупкость. В зоне сдвига было отмечено разрушение бетона, а БП арматура не имела повреждений. Неповрежденная арматура вызвала частичную деформацию образца после снятия нагрузки;
- прочность при сдвиге бетона с поперечной БП арматурой диаметром 8 мм выше, чем бетона с поперечной арматурой того же диаметра из стали;
- величина значения влияния арматуры на прочность при сдвиге должна быть умножена на коэффициент, равный $(E_b/E_s)^{1/2}$;

which are 0.46 and 0.375 for Group 3 and Group 4, respectively. This can be explained by the fact that the shear is not completely transferred by aggregate interlock nor by dowel action. Accordingly the correction factor is expected to be somewhere between these two limiting values.

Different codes use different correction factors to account for the effect of FRP's modulus of elasticity. ACI 440.1R-03 Code [9] considered the correction factor E_b/E_s , however, it has been abandoned in ACI 440.1R-06 [10]. CAN/CSA (2004) Code [10], JSCE 1997 Code [11], and Fib Report 40 [12] recommend the correction factor $(E_b/E_s)^{1/3}$. The Italian National Design Code CNR-DT 203/2006 [13] and ISIS M03 Manual [14] use the correction factor $(E_b/E_s)^{1/2}$. Finally, based on fracture mechanics, the work of Xu, and Reinhardt [15] supports the use of $(E_b/E_s)^{1/2}$.

The values of $(E_b/E_s)^{1/3}$ and $(E_b/E_s)^{1/2}$ for BFRP are 0.61 and 0.48 respectively. Accordingly, the correction factor $(E_b/E_s)^{1/2}$ better matches the current experimental results.

Cohesion Plus Friction Model [4]. When the contribution of the inherent shear strength of plain concrete is explicitly considered, the shear capacity can be predicted using the following equation given by Mattock [16]:

$$V_n = k_1 A_{cv} + 0,8 A_{vf} f_y, \quad (2)$$

where: $k_1=400$ psi (2.75 MPa) for normal-weight concrete. The first term on the right-hand side of equation (2) represents the inherent shear strength of plain concrete and resembles cohesion. The second term represents the contribution of the reinforcement bars and resembles friction. The latter term should be modified using the factor $(E_b/E_s)^{1/2}$ to account for the low stiffness of BFRP.

Thus, equation (2) can be rearranged to give the following equation for shear strength (MPa) of BFRP bars:

$$v_n = 2.75 + 0,8 \cdot \rho \cdot F_b \cdot (E_b/E_s)^{1/2}, \quad (3)$$

where: ρ is the ratio of the area of bar's cross-section to the shear area; F_b is the elastic limit of the bars' material; E_b is the modulus of elasticity of the bars' material; E_s is the modulus of elasticity of steel.

Figure 7 compares the shear strength predictions obtained using equation (3) with the experimental results. The solid line represents equation (3), while the dashed line represents the straight line that best fits the current experimental results. It can be seen that equation (3) forms an upper ceiling for the results. The coefficients obtained using regression analysis are 2.61 and 0.64 instead of 2.75 and 0.8, respectively. This indicates that the proposed form of equation (3) is suitable for predicting shear strength of concrete reinforced using bars of any material. Further testing is needed to accurately determine the coefficients of the equation.

Conclusion

From the previous tests result it can be concluded that:

- The failure mode in the control samples were brittle and with low deformation.
- The failure mode of specimens reinforced with 8 mm steel bars was not brittle. The specimens failed after developing high deformation and high load.
- The failure mode of specimens reinforced with 6 mm BFRP bars was not brittle. The specimens failed after developing medium deformations, but their failure load was lower than of steel reinforced specimens.
- The failure mode of specimens reinforced with 8 mm BFRP-bars was not brittle. Crushing of concrete in shear zone was noted and the BFRP bars were no damaged. The undamaged bars retrieved partly the deformation of the specimen upon removal of the load.
- The shear strength of concrete with 8 mm BFRP shear reinforcement has higher strength than concrete reinforced with same diameter steel shear reinforcement.

- данные результаты доказывают целесообразность использования коэффициента трения, равного 1,2 в модели трения при сдвиге, приведенного в ECP 203 для монолитно залитого бетона.

Авторы выражают благодарность доктору Мохамеду Камалю Мостафе за предоставление БП арматуры, использованной в данном исследовании.

- The contribution of reinforcement to the shear strength must be multiplied by a coefficient equal to $(E_b/E_s)^{1/2}$.
- The current results support the use a coefficient of friction equal 1.2 in the shear friction model given in ECP 203 for monolithic cast concrete.

The authors acknowledge the kind donation of the BFRP bars used in the current research by CMB's (Dr. Mohamed Kamal Mostafa).

Список литературы/References

1. Ibell T.J., Burgoyne C.J. The shear strength of concrete containing fibre-reinforced plastic (FRP) reinforcement. *The 23rd Conference on our World in Concrete and Structures*. 1998. Singapore, pp. 77–82.
2. Constantinescu H., Magureanu C. Study of shear behavior of high performance concrete using push off tests. *Journal of Applied Engineering Sciences*. 2011. 1(14). Issue 2, pp. 77–82.
3. Ashraf H. El- Zanaty. Shear transfer behavior of initially cracked concrete with compressive stresses normal to the shear plane. *Journal of the Egyptian society of Engineers*. 1995. Vol. 34, No. 1.
4. James K. Wight, James G. MacGregor. Reinforced Concrete: Mechanics and Design. Chapter 16: Shear Friction, Horizontal Shear Transfer, and Composite Concrete Beams. Sixth Edition. Prentice Hall, 2011. 1177 p.
5. ACI Committee 318, (2014), Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary, (ACI 318R-11), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
6. ECP 203, 2007, Egyptian Code for Design and Construction of Concrete Structures, Housing and Building National Research Center, Cairo, Egypt, Friberg, B.F., 1940. Design of Dowels in Transverse Joints of Concrete Pavements, Proceedings, American Society of Civil Engineers, 105, 1076-1116.
7. ACI Committee 440. (2003). "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars," ACI 440.1R-03, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
8. ACI Committee 440. (2006). "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars," ACI 440.1R-06, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
9. CAN/CSA S806–02. (2002). "Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers", Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 177 p.
10. Machida, A., ed. (1997). "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fibre Reinforcing Materials," Concrete Engineering Series 23, Japan Society of Civil Engineers, JSCE, Tokyo, Japan, 325 p.
11. Fib Task Group 9.3, FRP reinforcement in RC structures, Technical report, fib Bulletin No. 40, September 2007.
12. CNR-DT 203/2006, National Research Council, Advisory Committee On Technical Recommendations For Construction. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. CNR-DT 203/2006, June 2007, Rome.
13. ISIS-M03-01. (2001). Reinforcing concrete structures with fiber reinforced polymers. The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada, University of Winnipeg, Manitoba, 81 p.
14. Shilang Xu, Hans W. Reinhardt. Shear fracture on the basis of fracture mechanics. *Otto-Graf-Journal*. 2005. Vol. 16, p. 21.
15. Alan H. Mattock and Neil M. Hawkins. shear transfer in reinforced concrete—recent research. *Journal of the Prestressed Concrete Institute*. 1972. Vol. 17. No. 2, pp. 55–75.

При поддержке:

APCC Ассоциация развития стального строительства

РСТМ Российский союз поставщиков металлопродукции

Организатор:

МЕТТАМА ЭКСПО

Международная специализированная выставка

**Металло
Конструкции
2016**

Генеральный информационный партнер:
Специализированный журнал
МС «Металлоснабжение и сбыт»

Оргкомитет выставки:
+7 (495) 734-99-66
www.mc-expo.ru

22-25
марта 2016

Москва
ЦВК «Экспоцентр»

Г.В. НЕСВЕТАЕВ¹, д-р техн. наук; Г.С. КАРДУМЯН², канд. техн. наук (kardumyan@mail.ru)

¹ Ростовский государственный строительный университет (344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162)

² Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева (109428, Москва, ул. 2-я Институтская, 6, корп. 5)

Влияние собственных деформаций на пористость и свойства цементного камня

Предложены модели, устанавливающие связь между общей пористостью цементного камня и такими его свойствами, как предел прочности на сжатие, модуль упругости, коэффициент ползучести. Показано соответствие моделей экспериментальным данным. Модели позволяют прогнозировать изменение прочности и деформационных свойств цементного камня в зависимости от изменения его общей пористости под влиянием рецептурных либо технологических факторов.

Ключевые слова: цементный камень, пористость, предел прочности при сжатии, модуль упругости, коэффициент ползучести, деформационные свойства модели, расширяющие добавки, деформации расширения.

G.V. NESVETAEV¹, Doctor of Sciences (Engineering); G.S. KARDUMYAN², Candidate of Sciences(Engineering) (kardumyan@mail.ru)

¹ Rostov State University of Civil Engineering (162, Sotcialisticheskaya Street, Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation)

² Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev (6/5, Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Influence of strain on own porosity and properties of cement stone

Models establishing the relationship between the total porosity of cement stone and its properties such as the ultimate compressive strength, E-modulus and creep coefficient are proposed. Compliance of models with the experimental data is shown. Models make it possible to predict changes in the strength and deformation properties of cement stone depending on changes in its total porosity under the influence of prescription or technological factors.

Keywords: cement stone, porosity, ultimate compressive strength, E-modulus, creep coefficient, deformation properties, the model, the expanding additive, deformation of expansion.

Динамичное развитие строительного комплекса сопровождается появлением новых эффективных материалов, свойства которых в принципе требуют длительного изучения, а времени на это, как правило, недостаточно. В частности, в технологии бетонов широко применяются минеральные, органические и органо-минеральные добавки, способные оказывать влияние на процессы гидратации, формирование пористости и собственные деформации цементного камня [1] и, что закономерно, на все его свойства. В связи с этим особую актуальность приобретает необходимость уточнения известных закономерностей «состав–технология–структура–свойства», что позволит обеспечить более достоверное прогнозирование влияния новых материалов на свойства бетона, в том числе при длительной эксплуатации. Поскольку свойства бетона зависят в первую очередь от свойств цементного камня, целесообразно в первую очередь рассмотреть модели, определяющие зависимость прочности, деформационных свойств при кратковременном (начальный модуль упругости) и длительном (коэффициент ползучести) действии нагрузки.

Как известно, изменение пористости на 1% вызывает изменение прочности цементного камня (бетона) на 4–5%. Согласно [2], среднестатистическая зависимость прочности R от пористости цементного камня P имеет вид:

$$R = R_0 \cdot \exp(-4,84P). \quad (1)$$

На рис. 1 представлена зависимость предела прочности цементного камня R от его пористости P , а на рис. 2 – зависимость предела прочности цементного камня с расширяющей добавкой от величины деформации расширения при твердении в условиях свободного развития деформаций.

Зависимость (1) позволяет оценить, например, влияние собственных деформаций расширения при приме-

The dynamic development of the building complex is accompanied by the appearance of new efficient materials, which properties require, in principle, a long-term study, but, as a rule, there is no enough time for this. In particular, mineral, organic, and organic-mineral additives, which are able to influence on the processes of hydration, porosity formation and own deformation of cement stone [1] and on its properties, are widely used in the concrete technology. In this regard, the particular actuality is the need to clarify the known regularities “composition–technology–structure–properties”, this makes it possible to ensure the more reliable prediction of the influence of new materials on properties of concrete, including during the long-time operation. Since all the properties of concrete depend primarily on the properties of cement stone, it is reasonable to consider models which define the dependence of the strength, deformation properties under the short-time (an initial modulus of stiffness) and long-time (creep coefficient) actions of the load.

As it is known, the change in porosity by 1% causes a change in the strength of cement stone (concrete) by 4–5%. According to [2], the statistically average dependence of strength R on the porosity of cement stone P has the form:

$$R = R_0 \cdot \exp(-4,84P). \quad (1)$$

Fig. 1 presents the dependence of the ultimate strength of cement stone R on its porosity P , Fig. 2 presents the dependence of the ultimate strength of cement stone with expansive additive on the amount of the deformation of extension at hardening under the conditions of free development of deformations.

The dependence (1) makes it possible to evaluate, for example, the impact of own deformation of expansion, when the expanding additive is used, on the strength of cement stone, since the expansion, that is an increase in the volume at fixed mass, factually means the increase in porosity. The total porosity in the presence of EA increases from 3 to 50% [1]. But when expanding additive “Embelit” [11] is used, in spite of

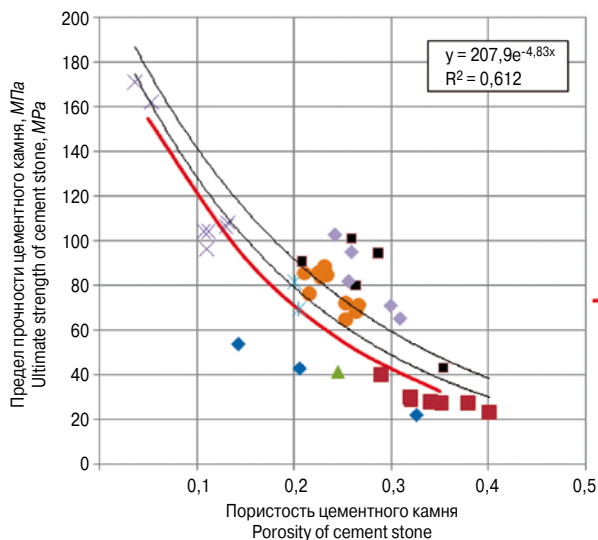


Рис. 1. Зависимость прочности цементного камня от пористости: 1–8 – соответственно данные Г.В. Несветаева [3–7]; Т – по формуле Рышкевича $R=200 \cdot \exp(-5.15 \cdot P)$ [8]

Fig. 1. Dependence of cement stone strength on porosity: 1–8 – accordingly, data [3–7], G.V. Nesvetaev; T – by the formula of Ryshkevich $R=200 \cdot \exp(-5.15 \cdot P)$ [8]

нении расширяющей добавки на прочность цементного камня, поскольку расширение, т. е. увеличение объема при неизменной массе, фактически означает увеличение пористости. Общая пористость в присутствии расширяющей добавки возрастает от 3 до 50% [1]. Однако при применении комплексной добавки расширяющего действия «Эмбэлит» [11], несмотря на зафиксированное увеличение пористости на 18,6% (без учета гелевых пор – на 4,4%), снижения прочности не происходило. Хотя в соответствии с формулой (1) такое увеличение пористости должно сопровождаться снижением прочности примерно на 40%. Отсутствие снижения прочности цементного камня с «Эмбэлит» связано с повышением прочности кристаллического сростка (R_0) и характером его пористости. Кроме того, возможно повышение прочности цементного камня (до 25%) с расширяющей добавкой при твердении в условиях ограничения деформаций. Пористость цементного камня с расширяющей добавкой при этом незначительно отличается от бездобавочного эталона.

Зависимость изменения прочности цементного камня с расширяющей добавкой, твердевшего без ограничения деформаций расширения (рис. 2), от величины деформации свободного расширения (т. е. от увеличения пористости) показывает, что снижение прочности цементного камня при возрастании деформаций расширения практически происходит вследствие возрастающей при этом пористости цементного камня, поскольку экспериментально наблюдаемое изменение прочности фактически соответствует закономерности ее изменения с учетом изменения пористости по формуле (1).

Поскольку прочность цементного камня является функцией его пористости, а модуль упругости цементного камня также зависит от прочности, закономерно модуль упругости $E_{цк}$ будет определяться пористостью цементного камня и вещественным составом цемента. Для определения модуля упругости цементного камня можно использовать [12] модель (2), включающую элементы структуры, каждый из которых характеризуется объемом V_i и модулем E_i :

- негидратированный цемент (клинкер $V_k=0,14-0,29$; $E_k=15500-105000$ МПа);
- гидратированный цементный камень, содержащий:

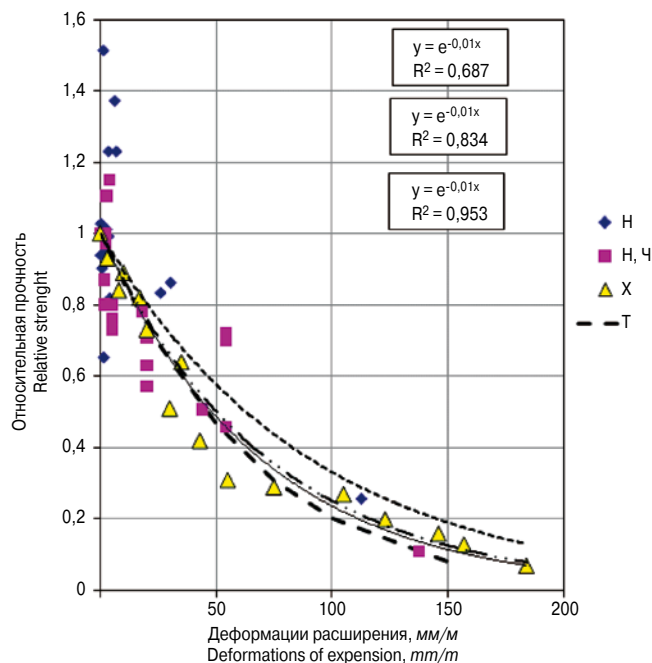


Рис. 2. Изменение прочности цементного камня с расширяющей добавкой в зависимости от деформации свободного расширения: H – данные Г.В. Несветаева; H, Ч – по данным [9]; X – по данным [10]; Т – зависимость изменения прочности от изменения пористости по формуле (1)

Fig. 2. Change in the strength of cement stone with an expansive additive depending on the deformation of free expansion: H – data of G.V. Nesvetaev; H, Ч – according to data [9]; X – according to data [10]; T – dependence of the change in strength on the change in porosity according to the formula (1)

the recorded increase in porosity by 18.6% (without account of gel pores – by 4.4%), the reduction in porosity does not occur, though in accordance with the formula (1) this increase in porosity should be followed by the reduction in the strength by 40% approximately. The absence of strength reduction is connected with an increase in the strength of a crystalline intergrowth (R_0); it is confirmed by the known fact of increasing the cement stone strength with expanding additive by up to 25% at hardening under the conditions of deformation limiting. In this case the porosity of cement stone with expanding additive is slightly different from the standard without an additive.

The dependence of the change in the strength of cement stone with expanding additive, hardened without limitation of expansion deformations (Fig. 2), on the value of free expansion deformation (that is on the increase in porosity) shows that the reducing the cement stone strength at the increase in expansion deformation practically occurs as a result of increasing the cement stone porosity, since the change in strength experimentally observed corresponds to the regularity of its change with due regard for the change in porosity according to the formula (1).

Since the strength of cement stone is a function of its porosity, and the modulus of elasticity of cement stone also depends on the strength, it is natural that the modulus of elasticity is determined by the porosity of cement stone E_{CS} and material composition of cement. To determine the modulus of cement stone elasticity, the model (2), which includes the following elements of the structure, each of them is characterized by the volume V_i and modulus E_i , can be used [12]:

- non-hydrated cement (clinker $V_c=0.14-0.29$; $E_c=15500-105000$ МПа);
- hydrated cement stone, containing:
- tobermorite gel ($V_g=0.28-0.67$; $E_g=33000$ МПа);
- portlandite ($V_{pc}=0.11-0.2$; $E_{pc}=15000$ МПа);
- ettringite ($V_{et}=0.08-0.23$; $E_{et}=40000-70000$ МПа);
- pores

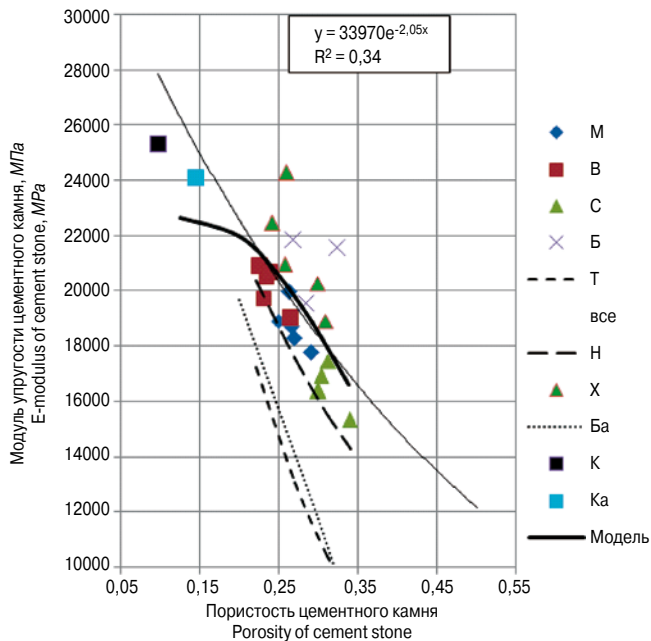


Рис. 3. Зависимость модуля упругости цементного камня от пористости: М, В, С, Б – цементный камень мальцовского, вольского, себряковского, белгородского цементов соответственно; Т – по формуле Маннинга; Н – по формуле $E=1483 \cdot R_0,6$; Х – по данным [6]; Б – по данным [4]; К – по данным [13]; Ка – по данным Г.С. Кардумян; модель – по формуле (2)

Fig. 3. Dependence of the E-modulus of cement stone on porosity: M, B, C, B – cement stone of Maltsovsky, Volsky, Sebyrakovsky, Belgorodsky cements respectively; T – by the Manning formula; H – by the formula $E=1483 \cdot R_0,6$; X – according to data [6]; B – according to data [4]; K – according to data [13]; Ka – according to data of G.S. Kardumyan Model – by the formula (2)

- тоберморитовый гель ($V_g=0,28-0,67$; $E_g=33000$ МПа);
- портландит ($V_{pc}=0,11-0,2$; $E_{pc}=15000$ МПа);
- эттрингит ($V_{et}=0,08-0,23$; $E_{et}=40000-70000$ МПа);
- поры:

$$E_{цк} = \frac{2}{\frac{1}{V_K E_K + V_g E_g + V_p E_p + V_{et} E_{et}} + \frac{V_K}{E_K} + \frac{V_g}{E_g} + \frac{V_p}{E_p} + \frac{V_{et}}{E_{et}}} \quad (2)$$

При построении модели принято, что «носителем» пористости в цементном камне является тоберморит, портландит и эттрингит, а распределение объема всех пор между указанными компонентами пропорционально их объемам и зависит от степени гидратации цемента.

На рис. 3 представлена зависимость модуля упругости цементного камня E от его пористости P.

Модель (2) при модуле упругости клинкера 28000 МПа, модуле упругости эттрингита 40000 МПа (см. линия «модель» на рис. 3) может использоваться для анализа влияния различных факторов на модуль упругости цементного камня. Величина модуля упругости цементного камня при «нулевой пористости» E_0 в формуле зависимости модуля упругости от пористости [12]:

$$E = E_0 \cdot \exp(-2,055 \cdot P), \quad (3)$$

как следует из представленных на рис. 3 данных, составляет 33970 ГПа.

Мера ползучести цементного камня в зависимости от его пористости может быть определена [14] как:

$$C_0 = 33970 \cdot \exp(-2,055 \cdot P) \cdot \left(\frac{1}{0,586 \cdot \exp(-3,24 \cdot P)} - 1 \right). \quad (4)$$

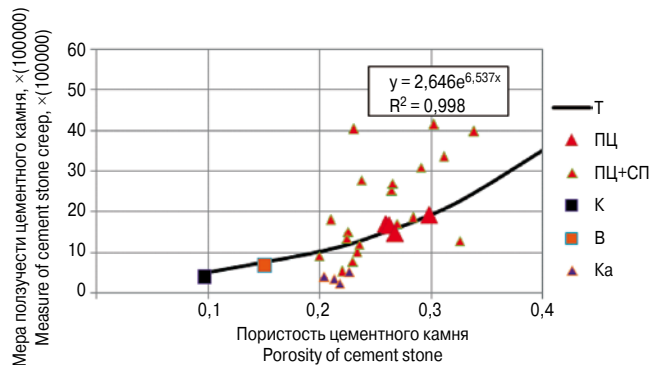


Рис. 4. Зависимость меры ползучести цементного камня от его пористости: Т – по ф.(4); ПЦ – цементный камень (В/Ц=0,3), полученный из цементов Белгородского, Вольского, Мальцовского, Себряковского заводов; ПЦ+СП – то же, с суперпластификаторами Glenium 30, Glenium 51, Structuro, Бином, СП1ВП; К – по данным [15]; В – по данным [16, 17], обработанным авторами; Ка – по данным Г.С. Кардумян

Fig. 4. Dependence of measure of cement stone creep on its porosity: T – by the formula (4); ПЦ – cement stone (B/C=0.3) produced from cements of Belgorodskiy, Volskiy, Maltsovskiy, Sebyrakovskiy plants; ПЦ+СП – the same, with superplasticizers Glenium 30, Glenium 51, Structuro, Бином, СП1ВП; К – according to data [15]; В – according to data [16, 17] processed by authors, Ка – according to data of G.S. Kardumyan

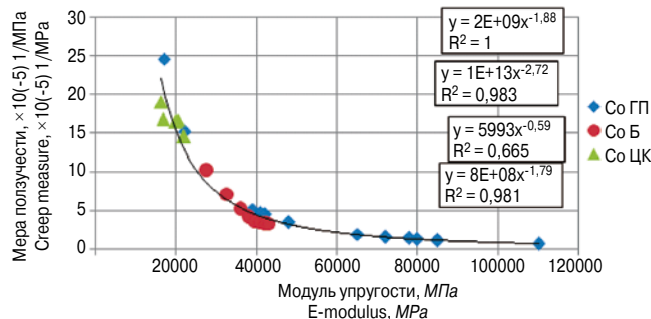


Рис. 5. Соотношение между модулем упругости и мерой ползучести различных материалов: ГП – для горных пород по [18]; Б – для тяжелых бетонов по СП 52-101-2003 при относительной влажности 40–70%; ЦК – для цементного камня (В/Ц=0,27) Вольского, Михайловского, Белгородского и Себряковского заводов

Fig. 5. The ratio between the E-modulus and the creep measure C_0 of various materials: ГП – for rocks according to [18]; Б – for heavy-weight concretes according to SP 52-101-2003 at relative humidity of 40–70%; ЦК – for cement stone (B/C=0.27) of Volsky, Mikhaylovsky, Belgorodsky, and Sebyrakovsky plants

$$E_{Cs} = \frac{2}{\frac{1}{V_K E_K + V_g E_g + V_p E_p + V_{et} E_{et}} + \frac{V_K}{E_K} + \frac{V_g}{E_g} + \frac{V_p}{E_p} + \frac{V_{et}}{E_{et}}} \quad (2)$$

When constructing the model, it is accepted that the “carrier” of porosity in the cement stone is a tobermorite, Portlandite, and ettringite and the distribution of the volume of all the pores among the specified components is proportional to their volumes and depends on the degree of hydration of cement.

Fig. 3 presents the dependence of the modulus of elasticity of cement stone E on its porosity P.

Model (2), when the modulus of elasticity of clinker is 28000 МПа, the modulus of elasticity of ettringite is 40000 МПа (see the line “Model” at Fig. 3), can be used for analyzing the influence of different factors on the modulus of cement stone elasticity. The value of the modulus of cement stone elasticity at “zero porosity” E_0 in the formula of dependence of the elasticity modulus on the porosity [12],

$$E = E_0 \cdot \exp(-2,055 \cdot P), \quad (3)$$

as follows from the data presented in Fig. 3, is 33970 GPa.

На рис. 4 — зависимость меры ползучести цементно-камня C_0 от его пористости.

Зависимость меры ползучести цементного камня от его пористости для цементного камня, полученного из портландцементного теста без добавок (рис. 4), хорошо согласуется (погрешность менее 10,3%) с экспериментальными данными. Различие в расчетных и экспериментальных значениях для цементного камня с суперпластификаторами (СП) свидетельствует о существенном влиянии СП на ползучесть цементного камня, что требует дополнительных целенаправленных исследований.

На рис. 5 представлено соотношение между мерой ползучести C_0 и модулем упругости E_0 для некоторых горных пород, бетонов и цементного камня без добавок.

Для различных материалов (горные породы с диапазоном изменения модуля упругости от 21000 до 115000 МПа, тяжелый бетон классов В20 — В100 и цементный камень) зависимость меры ползучести от модуля упругости универсальна (рис. 5) и имеет следующий вид:

$$C_0 = \frac{8 \cdot 10^3}{E_0^{1,795}}, \quad (5)$$

поэтому коэффициент ползучести может быть определен как:

$$\varphi \approx \frac{8 \cdot 10^3}{E_0^{1,8}}. \quad (6)$$

Представленные выше зависимости позволяют оценить влияние различных рецептурных факторов на прочность, модуль упругости и ползучесть цементного камня и бетона с учетом изменения его пористости, в частности соотношение между мерой ползучести бетона $C_{0,Б}$ и мерой ползучести цементного камня $C_{0,ЦК}$ может быть определено [14] для бетона из жестких смесей как:

$$\frac{C_{0,Б}}{C_{0,ЦК}} = 2,37 \cdot C_{0,ЦК}^{-0,663}; \quad (7)$$

а для бетона из высокоподвижных смесей:

$$\frac{C_{0,Б}}{C_{0,ЦК}} = 0,598 \cdot C_{0,ЦК}^{-0,146}. \quad (8)$$

Список литературы

1. Несветаев Г.В., Кардумян Г.С. О пористости цементного камня с учетом его собственных деформаций при твердении // *Бетон и железобетон*. 2013. № 1. С. 13–15.
2. Несветаев Г.В., Кардумян Г.С. Прочность цементного камня с суперпластификаторами и органоминеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении // *Бетон и железобетон*. 2013. № 5. С. 6–8.
3. Бабков В.В., Мохов В.Н., Капитонов С.М., Комохов П.Г. *Структурообразование и разрушение цементных бетонов*. Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. 376 с.
4. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. *Структура и свойства цементных бетонов*. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.
5. Шейкин А.Е. *Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня*. М.: Стройиздат, 1974. 192 с.
6. Shizawa Y., Joe Y., Takesu S., Urakawa Y. Study on Hydration Properties of Slag and Silica Fume Blended Cements for Ultra-high Strength Concrete / *9 International Congress on the Chemistry of Cement*. 1992. Vol. IV, pp. 658–664.
7. Харитонов А.М. *Структурно-имитационное моделирование в исследованиях свойств цементных компо-*

The measure of cement stone creep depending on its porosity can be defined [14] as:

$$C_0 = 33970 \cdot \exp(-2,055 \cdot P) \cdot \left(\frac{1}{0,586 \cdot \exp(-3,24 \cdot P)} - 1 \right). \quad (4)$$

Fig. 4 presents the dependence of the cement stone creep C_0 on its porosity

The dependence of the measure of cement stone creep on its porosity for cement stone produced from Portland cement paste without additives (Fig. C_0) is in good agreement (an error is less than 10.3%) with the experimental data. The difference in calculated and experimental values for cement stone with superplasticizers (SP) indicates the significant impact of SP on the cement stone creep that requires targeted research.

Fig. 5 presents the ratio between the creep measure C_0 and modulus of elasticity E_0 for some rocks, concretes, and cement stone without additives.

For different materials (rocks with the range of the elasticity modulus changing from 21000 up to 115000 МПа, heavy-weight concrete of В20–В100 classes, and cement stone), the dependence of the creep measure on the elasticity modulus is universal (Fig. 5) and has the following form:

$$C_0 = \frac{8 \cdot 10^3}{E_0^{1,795}}, \quad (5)$$

therefore, the creep coefficient can be determined as:

$$\varphi \approx \frac{8 \cdot 10^3}{E_0^{1,8}}. \quad (6)$$

Dependences presented above make it possible to evaluate the impact of different prescription factors on strength, elasticity modulus and creep of cement stone and concrete with due regard for the change in its porosity, in particular, the ratio between the measure of concrete creep $C_{0,c}$ and the measure of cement stone creep $C_{0,cs}$ can be determined for concrete of hard mixes as

$$\frac{C_{0,Б}}{C_{0,CS}} = 2,37 \cdot C_{0,CS}^{-0,663}, \quad (7)$$

and for concrete of high workability mixes as:

$$\frac{C_{0,С}}{C_{0,CS}} = 0,598 \cdot C_{0,CS}^{-0,146}. \quad (8)$$

References

1. Nesvetaev G.V., Kardumyan G.S. About Porosity of Cement Stone with Due Regard for its Own Deformations at Hardening. *Beton i zhelezobeton*. 2013. No. 1, pp. 13–15. (In Russian).
2. Nesvetaev G.V., Kardumyan G.S. Strength of Cement Stone with Super-plasticizers and Organic-Mineral Modifiers with Due Regard for its Own Deformations at Hardening. *Beton i zhelezobeton*. 2013. No. 5, pp. 6–8. (In Russian).
3. Babkov V.V., Mokhov V.N., Kapitonov S.M., Komokhov P.G.: *Structuroobrazovanie I razrushenie cementnyh betonov* [Structure Formation and Deterioration of Cement Concretes] Ufa: GUP « Ufa Polygraph». 2002. 376 p.
4. Sheykin A.E., Chekhovskiy Yu. V., Brusser M.I.: *Struktura I svoystva cementnyh betonov* [Structure and Properties of Cement Concretes]. Moscow: Stroyizdat. 1979. 344 p.
5. Sheykin A.E. *Struktura, prochnost i treschinostoykost cementnogo kamnya* [Structure, Strength and Crack Resistance of Cement Stone]. Moscow: Stroyizdat. 1974. 192 p.
6. Shizawa Y., Joe Y., Takesu S., Urakawa Y. Study on Hydration Properties of Slag and Silica Fume Blended Cements for Ultra-high Strength Concrete. *9 International Congress on the Chemistry of Cement*. 1992, Vol. IV, pp. 658–664.

- зитов: Автореф. дисс... д-р техн. наук, СПб., 2009. 36 с.
8. Несветаев Г.В. *Бетоны*. Ростов н/Д: Феникс, 2011. 381 с.
 9. Несветаев Г.В., Чмель Г.В. Комплексный модификатор для цементов и высокопрочных бетонов с компенсированной усадкой / *Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: Материалы II Международной конференции*. Ростов н/Д: 2002. С. 275–281.
 10. Chartschneko I.Ya. *Theoretische Grundlagen zur Anwendung von quellzementen in der baupraxis. Habilitation*. Weimar. 1995. 197 p.
 11. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Дондуков В.Г. Структура и свойства высокопрочных бетонов, содержащих комплексный органоминеральный модификатор «Эмбэлит» / *Бетон и железобетон – пути развития: Материалы II Всероссийской Международной конференции по бетону и железобетону*. М., 2005. Т. 3. С. 657–671.
 12. Несветаев Г.В., Кардумян Г.С. Модуль упругости цементного камня с суперпластификаторами и органоминеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении // *Бетон и железобетон*. 2013. № 6. С. 10–13.
 13. 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. 2006. С. 2–7.
 14. Несветаев Г.В., Кардумян Г.С. О ползучести цементного камня и бетона с модифицирующими добавками // *Бетон и железобетон*. 2014. № 4. С. 6–8.
 15. Каприелов С.С., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кузнецов Е.Н. О регулировании модуля упругости и ползучести высокопрочных бетонов с модификатором МБ-50С // *Бетон и железобетон*. 2003. № 6. С. 8–12.
 16. Виткуп Л.А. Исследование влияния плотности бетона на величину деформаций ползучести. Проблемы ползучести и усадки бетона. М.: Стройиздат, 1974. С. 72–75.
 17. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Dondukov V.G. A multicomponent modifier for shrinkage-compensated or self-stressed high strength concrete *Eight CANMET/ACI International Conference on superplasticisers and other chemical admixtures in concrete*. Sorento. 2006. pp. 87–102. (In Italy).
 18. Held M., Konig G. Ductility of large high-strength concrete columns in high rise building / *High-Strength Concrete International Conference*. Lillehammer. Norway: 1993. pp. 200–208.
 7. Kharitonov A.M. *Structural-Imitation Simulation in Studies of Cement Composites Properties*. Theses of Doctor of Technical Sciences (Engineering). St. Petersburg. 2009. 36 p. (In Russian).
 8. Nesvetaev G.V. *Betony [Concretes]*. Rostov-on-Don: “Phoenix”. 2011. 381 p.
 9. Nesvetaev G.V., Chmel G.V. Complex Modifier for Cement and High-Strength Concretes with Compensated Shrinkage. *Concrete and Reinforced Concrete in the Third Millennium – 2nd International Conference*. Rostov-on-Don: 2002. pp.275–281. (In Russian).
 10. Chartschneko I.Ya. *Theoretische Grundlagen zur Anwendung von quellzementen in der baupraxis. Habilitation*. Weimar. 1995. 197 p.
 11. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Dondukov V.A. Structure and Properties of High-Strength Concretes Containing the Complex Organic-Mineral Modifier “Embelit”. *Concrete and Reinforced Concrete – Ways of Development – II Russian International Conference on concrete and reinforced concrete*. Moscow: 2005. Vol. 3, pp. 657–671. (In Russian).
 12. Nesvetaev G.V., Kardumyan G.S. Modulus of Cement Stone Elasticity with Superplasticizers and Organic-Mineral Modifiers with Due Regard for its Own Deformations at Hardening. *Beton i zhelezobeton*. 2013. No. 6, pp. 10–13. (In Russian).
 13. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.T., Kardumyan G.S., Dondukov V.A. Modified High-Strength Fine Concretes with Improved Deformation Characteristic. *Beton i zhelezobeton*. 2006. No. 2, pp. 2–7. (In Russian)
 14. Nesvetaev G.V., Kardumyan G.S. Creep of Cement Stone and Concrete with Modifying Additives. *Beton i zhelezobeton*. 2014. No. 4, pp. 6–8. (In Russian).
 15. Kaprielov S.S., Karpenko N.I., Sheynfeld A.V., Kuznetsov E.N. About Regulation of Elasticity Modulus and Creep of High-Strength Concretes with Modifier MB-50C. *Beton i zhelezobeton*. 2003 No. 6, pp. 8–12. (In Russian).
 16. Vitkup L.A. *Research in Influence of Concrete Density on Value of Creep Deformations. Problems of Creep and Shrinkage of Concrete*. Moscow: Stroyizdat, 1974, pp. 72–75. (In Russian).
 17. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Kardumyan G.S., Dondukov V.G. A multicomponent modifier for shrinkage-compensated or self-stressed high strength concrete *Eight CANMET/ACI International Conference on superplasticisers and other chemical admixtures in concrete*. Sorento. 2006, pp. 87–102.
 18. Held M., Konig G. Ductility of Large High-Strength Concrete Columns in High-Rise Building. *High-Strength Concrete International Conference*. – Lillehammer, Norway: 1993, pp. 200–208.

В издательстве «Стройматериалы» вы можете приобрести специальную литературу**Книга Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента»**

Авторы – Зубехин А.П., Яценко Н.Д., Голованова С.П.

В книге представлены теоретические основы белизны и окрашивания керамических строительных материалов и белого портландцемента (БПЦ) с позиции теории цветности силикатных материалов в зависимости от их фазово-минерального состава, структуры, содержания хромофоров Fe, Mn и Ti, условий обжига и охлаждения (окислительных или восстановительных).

Установлены закономерности зависимости белизны, цвета и особенности окрашивания как пигментов, так и твердых растворов бесцветных фаз ионами-хромофорами от структуры, изовалентного или гетеро-валентного изоморфизма, образования окрашивающих кластеров. Разработаны эффективные способы управления белизной и декоративными свойствами строительных керамических материалов (фарфора, фаянса, облицовочной плитки, кирпича) и белого портландцемента.

Книга «Сухие строительные смеси. Состав, свойства»

Авторы – Корнеев В.И., Зозуля П.В.

Изложены основы современных представлений о сухих строительных смесях и растворах. Приведены основные определения и классификации сухих смесей. Охарактеризованы составляющие: вяжущие, заполнители, наполнители, функциональные добавки. Показана методика проектирования составов. Описаны основные группы ССС, их состав и свойства. В приложении даны основные применяемые термины и определения, наиболее употребляемые единицы измерения, перечень российских и зарубежных стандартов и др.

**Тел./факс: (499) 976-22-08, 976-20-36****E-mail: mail@rifsm.ru**

УДК 691.328.4

В.Г. СОЛОВЬЕВ¹, канд. техн. наук (s_vadim_g@mail.ru),
А.Ф. БУРЬЯНОВ¹, д-р техн. наук (rga-service@mail.ru); Х.-Б. ФИШЕР², доктор-инженер

¹ Московский государственный строительный университет (129337, Москва, Ярославское ш., д. 26)

² Веймарский строительный университет (Германия, 99423, Веймар, Гешвистер-Шолл-Штрассе, 8)

Особенности формирования структуры сталефибробетона при тепловой обработке

Приведены результаты теоретических и практических исследований структурообразования сталефибробетона при тепловой обработке. Установлено, что при определенном сочетании состава бетонной матрицы и режима тепловой обработки возможно получение объемно-преднапряженных сталефибробетонов. Установлены значения остаточных деформаций различных составов сталефибробетонов после тепловой обработки. Определены основные условия, обеспечивающие формирования преднапряжения в стальной фибре после тепловой обработки. Получены уравнения, отображающие зависимости прочностных характеристик сталефибробетонов после тепловой обработки и при твердении в нормальных условиях. Установлено, что формирование преднапряженного фиброкаркаса позволяет увеличить прочностные характеристики сталефибробетонов до 25% по сравнению с теми же составами, твердевшими в нормальных условиях.

Ключевые слова: сталефибробетон, тепловая обработка, объемное преднапряжение, прочностные характеристики.

V.G. SOLOVEV¹, Candidate of Sciences (Engineering) (s_vadim_g@mail.ru),

A.F. BURYANOV¹, Doctor of Sciences (Engineering) (rga-service@mail.ru); H.-B. FISCHER², Dr. Engineer

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

² Bauhaus-Universität Weimar (8, Geschwister-Scholl-Straße, Weimar, 99423, Germany)

Features of structure formation during heat treatment of steel fiber reinforced concrete

In this article are listed the results of the theoretical and practical research in structure formation of steel fiber reinforced concrete during heat treatment. It was found that in a certain combination of the composition of the concrete matrix and the mode of heat treatment may receive volume-prestressed steel fiber reinforced concretes. Determined the residual deformations of various compositions of steel fiber reinforced concretes after heat treatment. Determined the main conditions ensuring prestressed state formation in steel fiber after heat treatment. The equations obtained which are showing the dependence of strength characteristics after heat treatment and the hardening in normal conditions. Founded that the formation of prestressed fiber carcass can increase strength characteristics of steel fiber reinforced concrete up to 25% in compare with the same compositions was curing in normal conditions.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, heat treatment, volume prestressing, strength characteristics.

В настоящее время область применения и объемы производства фибробетонов постоянно увеличиваются. Накоплен значительный опыт применения фибробетонов в различных конструкциях, выполнен большой объем научно-исследовательских работ. Основными направлениями в области совершенствования фибробетонов являются: применение в качестве матрицы модифицированных бетонов с особыми свойствами; исследование бетонов с гибридным дисперсным армированием; исследования эффективности новых видов фибры, изготовленных из различных материалов.

Несмотря на продолжительные исследования, еще существует достаточно возможностей для улучшения свойств традиционных сталефибробетонов. Одной из таких возможностей, по нашему мнению, является целенаправленное создание условий для формирования объемно-преднапряженного фиброкаркаса в бетонной матрице. Ряд проведенных исследований позволяет выделить два основных способа, использование которых позволяет зафиксировать фибру в преднапряженном состоянии, — тепловое воздействие на фибробетонную смесь [1, 2] и применение расширяющихся добавок [3–6]. Однако применение данных способов, даже совместно, не гарантирует формирования преднапряженного фиброкаркаса и улучшения характеристик сталефибробетона из-за ряда особенностей.

Рассмотрим более подробно процесс формирования структуры сталефибробетона при тепловой обработке. На начальном этапе тепловой обработки происходит расширение стальных волокон и матрицы бетона, вызванное повышением температуры всего материала до 80–90°C. Во время данного периода, а также в процессе изотермической выдержки формируется структура бетонной матрицы, а стальные волокна находятся в растянутом состоянии. После завершения изотермической

Currently, the scope of application and the volume of production of fiber-reinforced concrete (FRC) are constantly increasing. Significant experience accumulated in the application of fiber-reinforced concrete in various designs, a large volume of scientific research are made. The main trends in the field of improving fiber concrete are: using as the matrix modified concretes with special properties, studying concretes with hybrid disperse reinforcement, and research of efficiency of new types of fibers made from different materials.

Although long-term studies, there are still enough opportunities to improve the properties of traditional steel FRC. One possibility, in our opinion, is a deliberate creation the conditions for the formation of volume-prestressed concrete matrix. Several studies, allows to allocate two basic ways, the use of which allows to keep the fiber in prestressed condition — the thermal effect on the fiber-reinforced concrete mixture [1, 2] and using expanding additives [3–6]. However, the use of these methods, even together, cannot guarantee the formation of prestressed fiber carcass and increase performance of steel FRC due to several features.

Consider in more detail the process of structure formation of steel FRC during heat treatment. At the initial stage because of the heat treatment take place an expansion of the steel fibers and the concrete matrix, caused by an increase in temperature of all the material up to 80–90°C. During this period and during the isothermal holding structure of concrete matrix is forming and steel fibers are in a stretched state. After completion of the isothermal holding temperature of steel FRC reduced and its residual strains are positive. As a result the matrix of the concrete compressive forces are transferred and fibers stored in the prestressed (stretched) state.

Stresses, resulting from linear strains in the steel fibers ($\sigma_{st,i}$), can be determined by knowing the value of deformation of the individual steel fibre after heat treatment, and calculate by the formula:

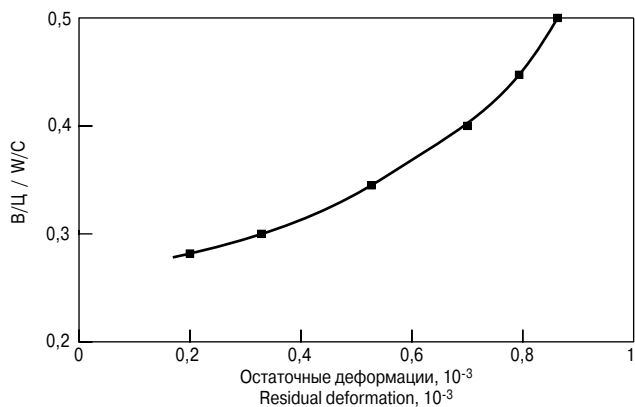


Рис. 1. Влияние водоцементного отношения на остаточные деформации сталефибробетона после тепловой обработки: мелкозернистый бетон с цементно-песчаным отношением 1:1,5; процент дисперсного армирования 0,5% (стальная фибра длиной 60 мм, диаметром 0,6 мм)

Fig. 1. The effect of water-cement ratio on the residual deformation after heat treatment of steel FRC: fine-grained concrete with cement-sand ratio 1:1.5, the percentage 0,5% of the disperse reinforcement (steel fiber length is 60 mm and a diameter 0,6 mm)

выдержки температура сталефибробетона снижается, и при этом его остаточные деформации положительны. В результате на матрицу бетона передаются сжимающие усилия, а фибра находится в преднапряженном (растянутом) состоянии.

Напряжения, возникающие в результате линейных деформаций в стальных волокнах ($\sigma_{st,t}$), можно определить, зная значение деформации отдельного стального волокна после тепловой обработки, и рассчитать по формуле:

$$\sigma_{st,t} = \Delta l \cdot E_{st} / l_a, \quad (1)$$

где l_a – начальная длина фибры, м; Δl – удлинение фибры, м; E_{st} – модуль упругости стали, ГПа.

Температурное удлинение фибры, происходящее до момента окончания изотермической выдержки, можно определить по следующей формуле:

$$\Delta l_t = \Delta t \cdot l_a \cdot \alpha_t, \quad (2)$$

где α_t – коэффициент линейного расширения стали, $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

С момента снижения температуры сталефибробетона стальные волокна будут стремиться вернуться к своим первоначальным размерам. Однако образовавшаяся бетонная структура будет препятствовать уменьшению стальной фибры до первоначальных размеров на величину остаточных деформаций (ε_{st}). Таким образом, линейные деформации стальной фибры после тепловой обработки будут равны остаточным деформациям сталефибробетона, а значение растягивающих напряжений будет определяться уравнением:

$$\sigma_{st,t} = k_{эф} \cdot \varepsilon_{st} \cdot E_{st}, \quad (3)$$

где $k_{эф}$ – коэффициент эффективности работы фибры.

Остаточные деформации сталефибробетона (ε_{st}) после тепловой обработки, так же как и для тяжелых бетонов, зависят в основном от состава бетонной матрицы и режима тепловой обработки [7]. На рис. 1 и 2 приведены зависимости остаточных деформаций сталефибробетона после тепловой обработки в зависимости от состава мелкозернистой матрицы.

Для проведения испытаний, результаты которых приведены на рис. 1, использовался мелкозернистый бетон с цементно-песчаным отношением 1:1,5, процент дисперсного армирования 0,5% (стальная фибра длиной 60 мм, диаметром 0,6 мм).

Согласно формуле (3) обязательным условием формирования преднапряжения в стальных фибрах являются положительные остаточные деформации после



Рис. 2. Остаточные деформации сталефибробетона после тепловой обработки: 1 – состава с цементно-песчаным отношением 1:1; 2 – состава с цементно-песчаным отношением 1:1,5; 3 – состава с цементно-песчаным отношением 1:3

Fig. 2. Residual deformation after heat treatment of steel FRC: 1 – with the cement-sand ratio 1:1; 2 – with the cement-sand ratio 1:1.5; 3 – with the cement-sand ratio 1:3

$$\sigma_{st,t} = \Delta l \cdot E_{st} / l_a, \quad (1)$$

where: l_a – initial length of the fiber, m; Δl – fiber elongation, m; E_{st} – modulus of elasticity of steel, GPa.

Thermal fiber elongation occurring before the end of the isothermal hold, can be determined by the following formula:

$$\Delta l_t = \Delta t \cdot l_a \cdot \alpha_t, \quad (2)$$

where: α_t – coefficient of linear expansion of steel, $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Since lowering the temperature of steel FRC, steel fibers will tend to return to their original size. However, the resulting concrete structure will prevent the reduction of steel fiber to its original size by the amount of residual strain (ε_{st}). Thus, the linear deformation of steel fiber after the heat treatment are equal to residual strain of steel FRC, and the value of tensile stress will be determined by the equation:

$$\sigma_{st,t} = k_{эф} \cdot \varepsilon_{st} \cdot E_{st}; \quad (3)$$

where $k_{эф}$ – coefficient of efficiency of the fiber.

Residual strain of steel FRC (ε_{st}) after heat treatment, as well as heavy concrete, depend mainly on the composition of the concrete matrix and heat treatment schedule [7]. Fig. 1 and 2 shows the residual strain of steel FRC after heat treatment depending on the composition of a fine-grained matrix.

For the tests, the results of which are shown in Fig. 1, was used fine-grained concrete with cement-sand ratio 1:1.5, the percentage 0,5% of the disperse reinforcement (steel fiber length is 60 mm and a diameter 0,6 mm).

According to the formula (3), a prerequisite for the formation of the prestressing steel fibers are positive residual deformation after heat treatment. However, the present conditions are not enough, there must still ensure a number of conditions to the effectiveness of the empirical coefficient of fiber ($k_{эф}$) was greater than zero. In this study were defined conditions for steel FRC based on fine concrete matrix, providing positive $k_{эф}$: use of steel fiber with anchoring at the ends, sand-cement ratio from 1:1.5 to 1:3, the strength of the concrete matrix at least 20 MPa, the pre-exposure is not more than 3 hours. The actual values of $k_{эф}$ calculated by the formula 3 and amounted 0.04–0.18. At the same time, tension in the steel fiber ($\sigma_{st,t}$) determined on cylindrical samples of fine concrete, in the center of which established the individual fiber extending beyond the end of the cylinder. The diameter of the sample is selected depending on the desired ratio of reinforcement. Fixation of the linear dimensions provided evidence of the actual strain of steel fiber.

It should be noted that the production of volume-prestressed steel FRC possible when a certain combination of

тепловой обработки. Однако выполнения данного условия недостаточно, необходимо обеспечение еще ряда условий, для того чтобы эмпирический коэффициент эффективности работы фибры ($k_{эф}$) был больше нуля. В рамках данного исследования были определены условия для сталефибробетона на основе мелкозернистой бетонной матрицы, обеспечивающие положительное значение $k_{эф}$: применение стальной фибры с анкерной на концах; цементно-песчаное отношение от 1:1,5 до 1:3; прочность бетонной матрицы не менее 20 МПа; время предварительной выдержки не более 3 ч. Фактические значения коэффициента $k_{эф}$ рассчитывались по формуле (3) и составили 0,04–0,18. При этом напряжения в стальной фибре ($\sigma_{ст,т}$) определялись на образцах цилиндрической формы из мелкозернистого бетона, в центре которых устанавливаются отдельные фибры, выступающие за торцевую часть цилиндра. Диаметр образцов подбирается в зависимости от требуемого коэффициента армирования. Фиксирование линейных размеров позволило получить данные о фактическом напряжении стальной фибры.

Следует особо отметить, что получение объемно-преднапряженных сталефибробетонов возможно при определенном сочетании состава бетонной матрицы, применяемых добавок и режима тепловой обработки. Применение только тепловой обработки сталефибробетона, на примере сталефибробетонов с расширяющимися добавками [8], не гарантирует явного эффекта. В каждом отдельном случае необходим последовательный подбор технологических факторов, в совокупности обеспечивающих формирование объемно-преднапряженного фиброкаркаса.

Для определения зависимостей прочностных свойств сталефибробетона, подвергаемого тепловой обработке, от состава было проведено исследование на основе трехфакторного эксперимента.

В качестве факторов варьирования были приняты: цементно-песчаное отношение (Ц:П), водоцементное отношение (В/Ц) и коэффициент армирования сталефибробетона по объему (μ_v). Для характеристики состава сталефибробетона были приняты не фактический расход какого-либо из компонентов, а их соотношения (Ц:П и В/Ц), что позволило двумя параметрами, которые возможно варьировать в пределах ограниченных правил абсолютных объемов, характеризовать состав цементно-песчаной матрицы. Уровни варьирования факторов приведены в таблице.

При проведении эксперимента был принят режим тепловой обработки (2)+3+6+1 ч при температуре изотермической выдержки 80°С.

В процессе экспериментальных исследований были получены уравнения (4)–(8), отображающие зависимости прочности при сжатии и растяжении при изгибе в возрасте 1 и 28 сут после тепловой обработки, а также при твердении в нормальных условиях:

$$R_{сж, 1} = 36 + 7,76(X_1) - 6,54(X_2) + 4,27(X_3) - 4,73(X_1)(X_2) - 5,4(X_1)^2; \quad (4)$$

$$R_{сж, 28} = 50,59 + 12,44(X_1) - 8,84(X_2) + 5,12(X_3) - 2,49(X_1)(X_3) - 11,9(X_1)^2 + 6,96(X_3)^2; \quad (5)$$

$$R_{сж, н.у.} = 46,02 + 17,76(X_1) - 7,74(X_2) + 5,08(X_3) - 3,47(X_1)^2 + 4,43(X_3)^2; \quad (6)$$

$$R_{из, 28} = 12,54 + 2,69(X_1) - 2,11(X_2) + 6,39(X_3) - 0,99(X_1)(X_3) - 0,96(X_2)(X_3) - 2,34(X_1)^2; \quad (7)$$

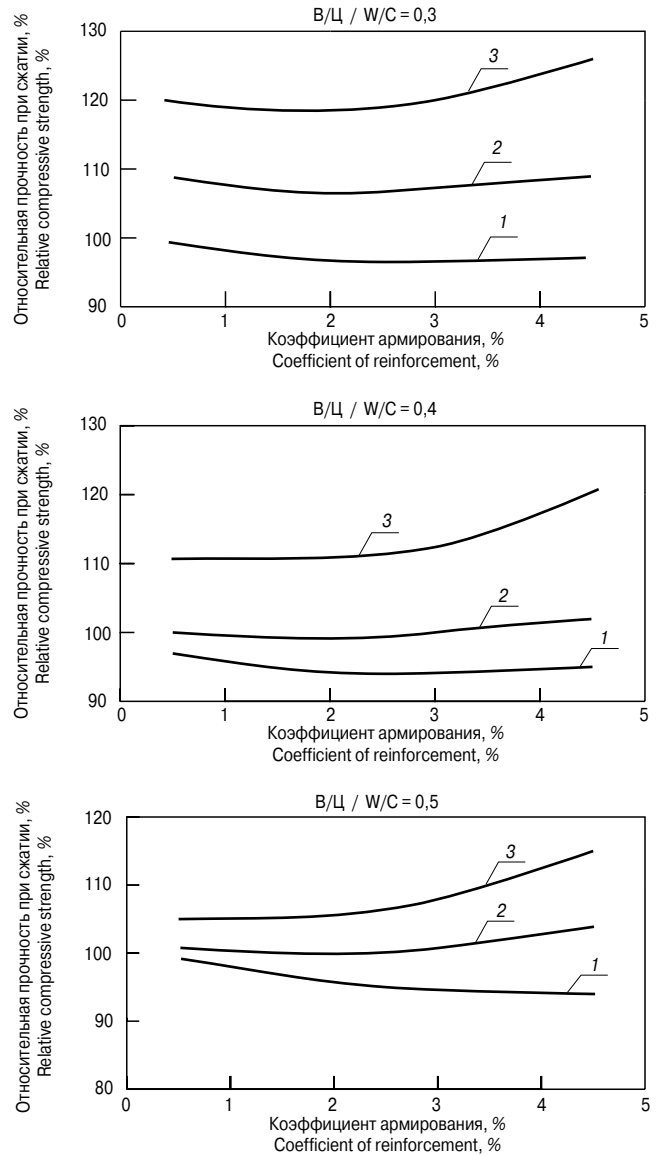


Рис. 3. Зависимость отношения прочности при сжатии сталефибробетонов после тепловой обработки к прочности при сжатии сталефибробетонов, твердевших в нормальных условиях, от коэффициента армирования: 1 – состава с цементно-песчаным отношением 1:1; 2 – состава с цементно-песчаным отношением 1:1,5; 3 – состава с цементно-песчаным отношением 1:3

Fig. 3. Dependence of the ratio compressive strength after heat treatment of steel FRC to steel FRC compressive strength, but under normal conditions cured from coefficient of reinforcement: 1 – with the cement-sand ratio 1:1; 2 – with the cement-sand ratio 1:1.5; 3 – with the cement-sand ratio 1:3

the composition of the concrete matrix, applied additives and heat treatment mode. Use only the heat treatment of steel FRC on the example of steel FRC with expanding additives [8] does not guarantee the apparent effect. In each case requires a consistent selection of technological factors in all providing the formation of a volume-prestressed fibercarcass.

To determine the dependencies of strength properties of steel FRC subjected to heat treatment from the composition, a study was made on the basis of a three-factor experiment.

The factors of variation were taken: a cement-sand ratio (C:S), water-cement ratio (W/C), and reinforcement ratio by volume of steel in FRC (μ_v). To characterize the composition of steel FRC were adopted not the actual consumption, but the components ratio (C:S and W/C), that allowed with two parameters which may vary limited within the rule of absolute volumes, characterize the composition of cement-sand matrix. Levels of factors variation are shown in Table.

Факторы Factors	Обозначение Symbol	Уровни варьирования Levels of variation		
		-1	0	+1
Цементно-песчаное отношение Ц/П Cement-sand ratio (C/S)	X ₁	0,33	0,67	1
Водоцементное отношение В/Ц Water-cement ratio (W/C)	X ₂	0,3	0,4	0,5
Объемное содержание фибры в бетоне μ _v , % Volume of steel FRC (μ _v)	X ₃	0,5	2,5	4,5

$$R_{из, н.у.} = 12,53 + 3,59(X_1) - 1,99(X_2) + 6,18(X_3) + 1,96(X_1)(X_3) - 0,81(X_2)(X_3) - 2,03(X_1)^2 + 1,67(X_2)^2 - 0,98(X_3)^2; \quad (8)$$

Сравнительный анализ по показателю прочности при сжатии сталефибробетонов в возрасте 28 сут, подвергнутых тепловой обработке, с теми же составами, твердевшими все время в нормальных условиях, приведен на рис. 3.

В результате проведенных исследований установлено, что при оптимально подобранном составе и режиме тепловой обработки возможно получение объемно-преднапряженных сталефибробетонов с увеличенными прочностными характеристиками до 25% по сравнению с теми же составами, твердевшими в нормальных условиях.

Наиболее перспективной областью применения объемно-преднапряженных сталефибробетонов являются сборные конструкции и массивные монолитные сооружения, так как именно при их производстве возможно оптимальное сочетание всех технологических факторов, обеспечивающих получение данных композиционных материалов.

Список литературы

1. Sukontasukkul P., Pomchiengpin W., Songpiriyakij S. Post-crack Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature // *Construction and Building Materials*. 2010. No. 24, pp. 1967–1974.
2. Соловьев В.Г., Бурьянов А.Ф., Елсуфьева М.С. Особенности производства сталефибробетонных изделий и конструкций // *Строительные материалы*. 2014. № 3. С. 18–21.
3. Yan Z., Pantelides C.P. Concrete column shape modification with FRP shells and expansive cement concrete // *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. Issue 1, pp. 396–405.
4. Cao S.P., Zhou Q.F., Peng Y.L., Li G.X. Effects of expansive agent and steel fiber on the properties of the fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete // *Applied Mechanics and Materials*. 2013 Vol. 357–360, pp. 1332–1336.
5. Wang A., Deng M., Sun D., Mo L., Wang J., Tang M. Effect of combination of steel fibers and MgO-type expansive agent on properties of concrete // *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*. 2011. Vol. 26, pp. 786–790.
6. Елсуфьева М.С., Соловьев В.Г., Бурьянов А.Ф. Применение расширяющихся добавок в сталефибробетоне // *Строительные материалы*. 2014. № 8. С. 60–63.
7. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2011. 528 с.
8. Corinaldesi V., Nardinocchi A., Donnini J. The influence of expansive agent on the performance of fibre reinforced cement-based composites // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 91, pp. 171–179.

While the experiment was passing heat mode accepted (2)+3+6+1 hour(s) at the temperature of the isothermal hold 80°C.

During the experimental studies were obtained equation (4)–(8) showing relationships between compressive strength and the flexural tensile aged 1 days and 28 days after heat treatment and hardening in normal conditions.

$$R_{c, 1} = 36 + 7,76(X_1) - 6,54(X_2) + 4,27(X_3) - 4,73(X_1)(X_2) - 5,4(X_1)^2; \quad (4)$$

$$R_{c, 28} = 50,59 + 12,44(X_1) - 8,84(X_2) + 5,12(X_3) - 2,49(X_1)(X_3) - 11,9(X_1)^2 + 6,96(X_3)^2; \quad (5)$$

$$R_{c, n.c.} = 46,02 + 17,76(X_1) - 7,74(X_2) + 5,08(X_3) - 3,47(X_1)^2 + 4,43(X_3)^2; \quad (6)$$

$$R_{fl, 28} = 12,54 + 2,69(X_1) - 2,11(X_2) + 6,39(X_3) - 0,99(X_1)(X_3) - 0,96(X_2)(X_3) - 2,34(X_1)^2; \quad (7)$$

$$R_{fl, n.c.} = 12,53 + 3,59(X_1) - 1,99(X_2) + 6,18(X_3) + 1,96(X_1)(X_3) - 0,81(X_2)(X_3) - 2,03(X_1)^2 + 1,67(X_2)^2 - 0,98(X_3)^2; \quad (8)$$

Comparative analysis in terms of compressive strength of steel FRC after 28 days subjected to a heat treatment with the same compositions cured all the time under normal conditions is shown in Fig. 3.

As a result of studies, it found that by optimally chosen composition and heat treatment schedule may receive a volume-prestressed steel FRC with increased strength characteristics up to 25% compared with the same compositions cured under normal conditions.

The most promising area of application of volume-prestressed steel FRC are prefabricated and massive monolithic structures cause in their production possible optimal combination of technological factors, providing those composite materials.

References

1. Sukontasukkul P., Pomchiengpin W., Songpiriyakij S. Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature. *Construction and Building Materials*. 2010. No. 24, pp. 1967–1974.
2. Solovyev V.G., Buryanov A.F., Yelsufyeva M.S. Features of the production of steel fibre concrete products and designs. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 3, pp. 18–21. (In Russian).
3. Yan Z., Pantelides C.P. Concrete column shape modification with FRP shells and expansive cement concrete. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. Issue 1, pp. 396–405.
4. Cao S.P., Zhou Q.F., Peng Y.L., Li G.X. Effects of expansive agent and steel fiber on the properties of the fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2013 Vol. 357–360, pp. 1332–1336.
5. Wang A., Deng M., Sun D., Mo L., Wang J., Tang M. Effect of combination of steel fibers and MgO-type expansive agent on properties of concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*. 2011. Vol. 26, pp. 786–790.
6. Elsufoeva M.S., Solovyev V.G., Buryanov A.F. Applying of expanding additives in the concrete reinforced steel fiber. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 8, pp. 60–63. (In Russian).
7. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betona* [Technology of Concrete]. Moscow: ASV. 2011. 528 p.
8. Corinaldesi V., Nardinocchi A., Donnini J. The influence of expansive agent on the performance of fibre reinforced cement-based composites. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 91, pp. 171–179.

УДК 674.047

С.В. ФЕДОСОВ¹, д-р техн. наук, академик РААСН, президент; А.А. КОТКОВ¹, инженер;
В.Е. МИЗОНОВ², д-р техн. наук; Н.Н. ЕЛИН¹, д-р техн. наук

¹ Ивановский государственный политехнический университет (153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, 20)

² Ивановский государственный энергетический университет (153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34)

Моделирование кинетики сушки листового материала при реверсивной подаче сушильного агента*

Предложена нелинейная ячеечная математическая модель кинетики сушки длинномерного листового материала параллельным потоком газа. Модель позволяет рассчитывать кинетику сушки по локальным параметрам состояния материала и газа и учитывает продольную теплопроводность и влажностепроводность в материале. Показано, что реверс подачи газа в рационально подобранные моменты времени позволяет существенно снизить неравномерность распределения влаги в материале в процессе сушки.

Ключевые слова: листовой пористый материал, влагосодержание, сушка, теплоотдача, массоотдача, теплопроводность, влажностепроводность, ячеечная модель, вектор состояния, переходная матрица, реверс подачи газа.

S.V. FEDOSOV¹, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS, President, A.A. KOTKOV¹, Engineer;
V.E. MIZONOV², Doctor of Sciences (Engineering); N.N. YELIN¹, Doctor of Sciences (Engineering)

¹ Ivanovo State Polytechnic University (20, 8 Marta Street, Ivanovo, 153037, Russian Federation)

² Ivanovo State Power Engineering University (34, Rabfakovskaya Street, Ivanovo, 153003, Russian Federation)

Simulation of drying kinetics of sheet material at reversible supply of drying gas*

A non-linear cell mathematical model of drying kinetics of long-measuring sheet material by parallel gas flow is proposed. The model allows calculating the drying kinetics based on the local state of material and gas and takes into account longwise heat conduction and moisture conduction. It is shown that the reverse of gas supply at rationally chosen moments of time allows considerable decrease of the non-homogeneity of moisture content distribution during drying process.

Keywords: sheet porous material, moisture content, drying, heat emission, moisture emission, heat conduction, moisture conduction, cell model, state vector, transition matrix, reverse of gas supply.

Научные основы моделирования и расчета процессов сушки на основе интегральных балансовых соотношений по средней теплоте и массе влаги для всего материала и сушильного агента хорошо разработаны и имеют практически полное эмпирическое обеспечение [1–4]. Однако интегральный подход в принципе не может прогнозировать эволюцию распределения теплофизических параметров материала и газа, что становится особенно важным при сушке длинномерных листовых материалов, когда неравномерность распределения влаги по длине может приводить к снижению физико-механических свойств материала: образованию трещин, появлению остаточных напряжений и других дефектов [5]. Теоретические основы описания сушки как распределенного процесса, сформулированные в терминах дифференциальных уравнений в частных производных, приведены в работах [1–3]. Однако аналитические решения этих уравнений возможны только при далеко идущих упрощениях, часто неприемлемых в реальной практике расчетов. Среди разнообразных численных методов можно выделить метод ячеечного моделирования [6–8 и др.]. Теоретические основы применения ячеечных моделей, использующих математический аппарат теории цепей Маркова, к описанию процессов тепло-массопереноса приведены в работах [7, 8]. Авторы считают этот подход наиболее перспективным, так как он базируется на наглядных балансовых уравнениях для элементарной ячейки, реализуется с помощью универсального вычислительного алгоритма сборки и свободен от ограничений на линейность процесса и стационарность краевых условий.

Расчетная схема моделируемого процесса показана на рис. 1. Листовой материал длиной L , толщиной H и единичной шириной уложен в пакеты с зазорами B , через

Scientific foundations of simulation and computation of drying processes based on the integral relationships for average heat and moisture balance for whole material and drying gas are well developed and have practically complete empirical support [1–4]. However, the integral approach cannot predict the evolution of material and gas thermophysical parameters distribution in principle. The latter becomes very important for drying of elongated sheet materials where non-homogeneity of moisture distribution over material length can lead to the decrease of physical and mechanical properties of material: formation of cracks, residual stresses and other flaws [5]. Theoretical foundations of drying description as a distributed process formulated in the terms of partial differential equations are presented in [1–3]. However, analytical solutions of these equations are possible only under far-reaching assumptions that are not always acceptable for real practice of calculations. The method of cell modeling can be marked out among other numerical methods of their solutions [6–8 and others]. The theoretical foundations of application of the cell approach, based on the mathematical tool of the theory of Markov chains, to model processes of heat and mass transfer are described in [7, 8]. According to the authors viewpoint this approach looks most perspective because it is based on the clear balance equations for elementary cell, can be realized on the basis the universal computational algorithm and is free from limitation on the process linearity and stationarity of boundary conditions.

The design diagram of the process to be modeled is shown in Fig. 1. A sheet material of the length L , thickness H and unit width is placed parallel with the gap B , a drying gas moves through which. If the number of sheets is big enough, the representative object of modeling surrounded in the figure by the dashed line can be separated where b is the half width of the material, h is the half width of the gas channel.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-01684).
* This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant № 15-08-01684).

которые движется сушильный агент. При достаточно большом числе уложенных листов из пакета может быть выделен представительный объект моделирования, окруженный на рис. 1 штриховой линией, где b – половина толщины материала; h – половина ширины канала для прохода газа. Представим материал одномерной цепью n прямоугольных ячеек с длинами сторон h и $\Delta y=L/n$, а канал для прохода газа – одномерной цепью n ячеек размерами $b \times \Delta y$. Считается, что в каждый момент времени все теплофизические параметры равномерно распределены внутри каждой ячейки. Состояние процесса наблюдается в дискретные моменты времени τ_k , разделенные малым временем $\Delta\tau$, так что $\tau_k=(k-1)\Delta\tau$; k – номер временного перехода (целочисленный аналог текущего времени).

В каждый момент времени теплофизические параметры состояния цепи для материала представлены вектор-столбцами размером $n \times 1$: Q_s^k – распределение теплоты по ячейкам материала; t_s^k – распределение температуры; W_s^k – распределение массы влаги и т. д. Цепь для газа характеризуется вектор-столбцами состояния Q_g^k, t_g^k и W_g^k размером $n \times 1$.

Будем считать, что в течение одного временного перехода протекают две стадии процесса: перенос теплоты и влаги между ячейками цепи газа и примыкающим к ним ячейками материала (направление переноса влаги показано на рис. 1 темной стрелкой, а теплоты – светлой) и перенос теплоты и влаги между ячейками отдельных цепей.

Кинетика процесса описывается следующей системой рекуррентных матричных соотношений:

$$W_s^{k+1} = P_w^k (W_s^k - \Delta W^k), \quad (1)$$

$$Q_s^{k+1} = P_Q^k (Q_s^k + \Delta Q^k - \Delta Q_w^k), \quad (2)$$

$$W_g^{k+1} = P_G^k (W_g^k - \Delta W^k) + \Delta W_f^k, \quad (3)$$

$$Q_g^{k+1} = P_G^k (Q_g^k - \Delta Q^k) + \Delta Q_f^k. \quad (4)$$

В этих соотношениях величины с символом Δ означают переданную между сходственными ячейками цепей за время $\Delta\tau$ теплоту или массу влаги, а именно:

- испарение влаги из ячеек материала:

$$\Delta W^k = \beta \cdot (p_w^k - p_v^k) \Delta y \Delta \tau, \quad (5)$$

где $p_w^k = p_w^k(t_s^k)$ и $p_v^k = p_v^k(X_g^k)$ – векторы парциальных давлений влаги над поверхностью воды и в газе, рассчитываемые по эмпирическим соотношениям; X_g^k – вектор влагосодержания в газе, кг/кг; β – вектор коэффициентов массоотдачи, оператор; \cdot означает поэлементное перемножение векторов;

- передача теплоты от газа влажному материалу:

$$\Delta Q^k = \alpha \cdot (t_g^k - t_s^k) \Delta y \Delta \tau, \quad (6)$$

где α – вектор коэффициентов теплоотдачи;

- расходование теплоты ΔQ^k на испарение влаги из ячеек материала:

$$\Delta Q_w^k = \Delta W^k \cdot r, \quad (7)$$

где r – вектор удельной теплоты испарения влаги в ячейках, рассчитываемый по параметрам их теплофизического состояния;

- передача теплоты ячейкам материала:

$$\Delta Q_s^k = \Delta Q^k - \Delta Q_w^k. \quad (8)$$

Продольный перенос теплоты и влаги в материале контролируется матрицей теплопроводности P_Q^k и ма-

The material is presented as the chain of n rectangular cell of the dimensions h and $\Delta y=L/n$, and the gas channel is also presented as the chain of similar cells of the dimensions $b \times \Delta y$.

It is supposed that at each moment of time all thermophysical properties are homogeneously distributed over each cell. The state of the process is observed at the discrete moments of time τ_k , separated by the small transition duration $\Delta\tau$, such as $\tau_k=(k-1)\Delta\tau$ where k is the transition number, which is digital analogue of current time.

At each moment of time distributions of thermophysical parameters over the chain for material is presented as the column vectors of the size $n \times 1$: Q_s^k is the heat distribution over the cells, t_s^k is the temperature distribution, W_s^k is the moisture content distribution, and so on. The chain for the gas is also characterized by the column vectors Q_g^k, t_g^k and W_g^k of the size $n \times 1$.

Let us suppose that during one transition duration the process can be separated into two simultaneous stages: heat and moisture transfer between the adjacent cells of the material and gas chains (the direction of moisture transfer is shown in Fig. 1 by the dark arrow and of the heat transfer by the light arrow), and heat and moisture transfer along the separate chains.

The kinetics of the process can be described by the following set of recurrent matrix equations:

$$W_s^{k+1} = P_w^k (W_s^k - \Delta W^k), \quad (1)$$

$$Q_s^{k+1} = P_Q^k (Q_s^k + \Delta Q^k - \Delta Q_w^k), \quad (2)$$

$$W_g^{k+1} = P_G^k (W_g^k - \Delta W^k) + \Delta W_f^k, \quad (3)$$

$$Q_g^{k+1} = P_G^k (Q_g^k - \Delta Q^k) + \Delta Q_f^k. \quad (4)$$

The symbol Δ in these equations is assigned to the amount heat and moisture transferred between the adjacent cells. These values can be calculated as:

- moisture evaporation from the cells of material

$$\Delta W^k = \beta \cdot (p_w^k - p_v^k) \Delta y \Delta \tau, \quad (5)$$

where: $p_w^k = p_w^k(t_s^k)$ and $p_v^k = p_v^k(X_g^k)$ are the vectors of vapor partial pressure above the material surface and in gas; X_g^k is the vector of moisture content in gas; β is the vector of moisture emission coefficients, the operator; \cdot means element-by-element multiplication of vectors:

- heat emission from gas to material:

$$\Delta Q^k = \alpha \cdot (t_g^k - t_s^k) \Delta y \Delta \tau, \quad (6)$$

where: α is the vector of heat emission coefficients;

- consumption of the heat ΔQ^k for moisture evaporation from the cells of material:

$$\Delta Q_w^k = \Delta W^k \cdot r, \quad (7)$$

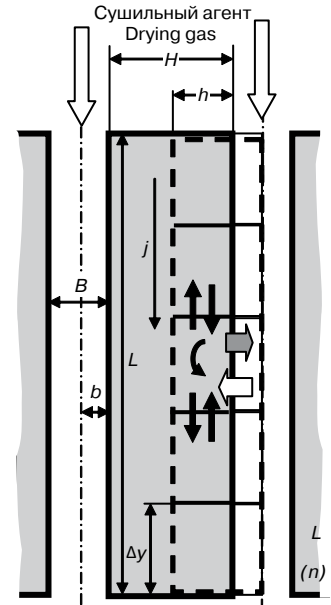


Рис. 1. Расчетная схема процесса и его ячейная модель

Fig. 1. Design diagram of the process and its cell model

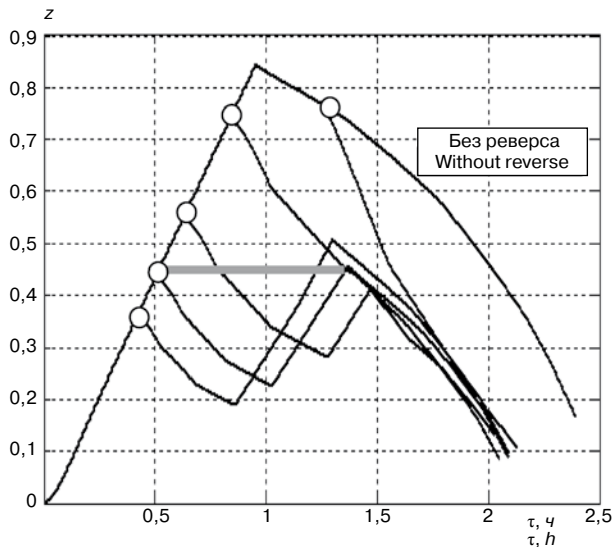


Рис. 2. Изменение неравномерности влагосодержания при сушке с реверсом газа при различных моментах переключения

Fig. 2. Variation of moisture content non-homogeneity at drying with gas reverse at different moments of switch

трицей влагопроводности P_W^k , имеющими размер $n \times n$ элементы, которых рассчитываются по формулам [6, 7]:

$$P_{Q,j,j+1}^k = \lambda_j^k \Delta\tau / c_s \rho_s \Delta y^2, \quad (9)$$

$$P_{Q,j+1,j}^k = \lambda_j^k \Delta\tau / c_s \rho_s \Delta y^2, \quad (10)$$

$$P_{Q,j,j}^k = 1 - \sum_{i=1}^n P_{Q,i,j}^k, \quad i=1, \dots, n, \quad (11)$$

$$P_{W,j,j+1}^k = D_j^k \Delta\tau / \Delta y^2, \quad (12)$$

$$P_{W,j+1,j}^k = D_j^k \Delta\tau / \Delta y^2, \quad (13)$$

$$P_{W,j,j}^k = 1 - \sum_{i=1}^n P_{W,i,j}^k, \quad i=1, \dots, n, \quad (14)$$

где λ_j^k и D_j^k – коэффициенты тепло- и влагопроводности, рассчитываемые по локальным тепловлажностным параметрам в ячейках; c_s и ρ_s – теплопроводность и плотность влажного материала.

Поскольку одним из объектов исследования является реверсивная сушка, переходная матрица для газа P_G^k и векторы внешних источников теплоты ΔQ_f^k и массы влаги ΔW_f^k зависят от направления движения газа в данный момент. Элементы матрицы P_{G1}^k при прямом ходе газа рассчитываются по формулам:

$$P_{G1,j+1,j}^k = V_g \Delta\tau / \Delta y, \quad j=1, \dots, m-1, \quad (15)$$

$$P_{G1,j,j}^k = 1 - V_g \Delta\tau / \Delta y, \quad j=1, \dots, m-1, \quad (16)$$

$$P_{G1,n,n}^k = 1 - V_g \Delta\tau / \Delta y, \quad (17)$$

где V_g – скорость газа.

Векторы источников имеют ненулевые элементы только для тех ячеек, в которые подается газ. Эти элементы при прямом ходе (подача газа в ячейку 1) рассчитываются по формулам:

$$\Delta W_{f1}^k = G_{g0} \Delta\tau X_{g0} / (1 + X_{g0}), \quad (18)$$

$$\Delta Q_{f1}^k = G_{g0} t_{g0} \Delta\tau (c_g + c_v X_{g0}) / (1 + X_{g0}), \quad (19)$$

где G_{g0} – расход газа; X_{g0} – его начальное влагосодержание; t_{g0} – начальная температура газа; c_g – теплоемкость сухого газа; c_v – теплоемкость водяного пара.

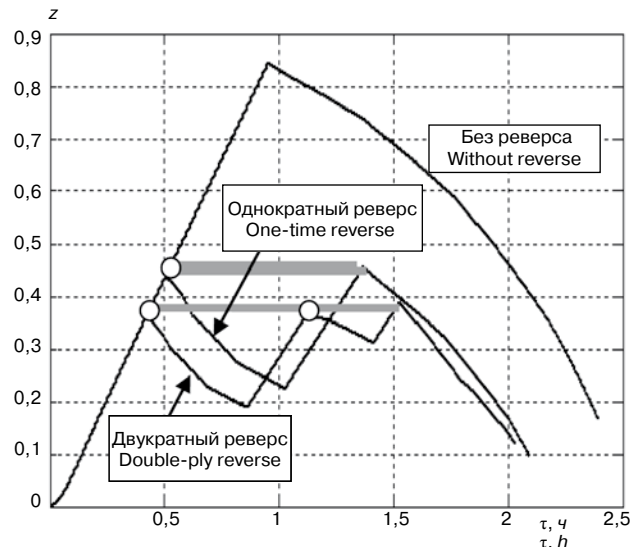


Рис. 3. Изменение неравномерности влагосодержания при сушке с однократным и двукратным реверсом газа при оптимальных моментах переключения

Fig. 3. Variation of moisture content non-homogeneity at drying with one-time and double-ply gas reverse at optimal moments of switch

where: r is the vector of specific heat of evaporation that should be calculated depending on the thermophysical parameters;

- heat transfer to the cells of material:

$$\Delta Q_s^k = \Delta Q^k - \Delta Q_w^k, \quad (8)$$

The longwise heat and mass transfer in material is controlled by the matrices of heat conduction P_Q^k and moisture conduction P_W^k of the size $n \times n$, elements of which can be calculated by the following [6, 7]:

$$P_{Q,j,j+1}^k = \lambda_j^k \Delta\tau / c_s \rho_s \Delta y^2, \quad (9)$$

$$P_{Q,j+1,j}^k = \lambda_j^k \Delta\tau / c_s \rho_s \Delta y^2, \quad (10)$$

$$P_{Q,j,j}^k = 1 - \sum_{i=1}^n P_{Q,i,j}^k, \quad i=1, \dots, n, \quad (11)$$

$$P_{W,j,j+1}^k = D_j^k \Delta\tau / \Delta y^2, \quad (12)$$

$$P_{W,j+1,j}^k = D_j^k \Delta\tau / \Delta y^2, \quad (13)$$

$$P_{W,j,j}^k = 1 - \sum_{i=1}^n P_{W,i,j}^k, \quad i=1, \dots, n, \quad (14)$$

where: λ_j^k and D_j^k are the heat and moisture conduction coefficients to be calculated according to the current properties of the cells for material; c_s and ρ_s are the heat capacity and density of the moist material.

As far as one of the investigation objectives is the reversible drying, the transition matrix for gas P_G^k and vectors of the external sources of heat ΔQ_f^k and moisture mass ΔW_f^k depend on the direction of gas motion. The elements of the matrix P_{G1}^k for the direct current of gas flow are to be by the formulae:

$$P_{G1,j+1,j}^k = V_g \Delta\tau / \Delta y, \quad j=1, \dots, m-1, \quad (15)$$

$$P_{G1,j,j}^k = 1 - V_g \Delta\tau / \Delta y, \quad j=1, \dots, m-1, \quad (16)$$

$$P_{G1,n,n}^k = 1 - V_g \Delta\tau / \Delta y, \quad (17)$$

where: V_g is the gas velocity.

The source vectors have non-zero elements only for the cells the gas is supplied to. These elements for the direct current flow (the gas is supplied to the cell 1) have the following form:

$$\Delta W_{f1}^k = G_{g0} \Delta\tau X_{g0} / (1 + X_{g0}), \quad (18)$$

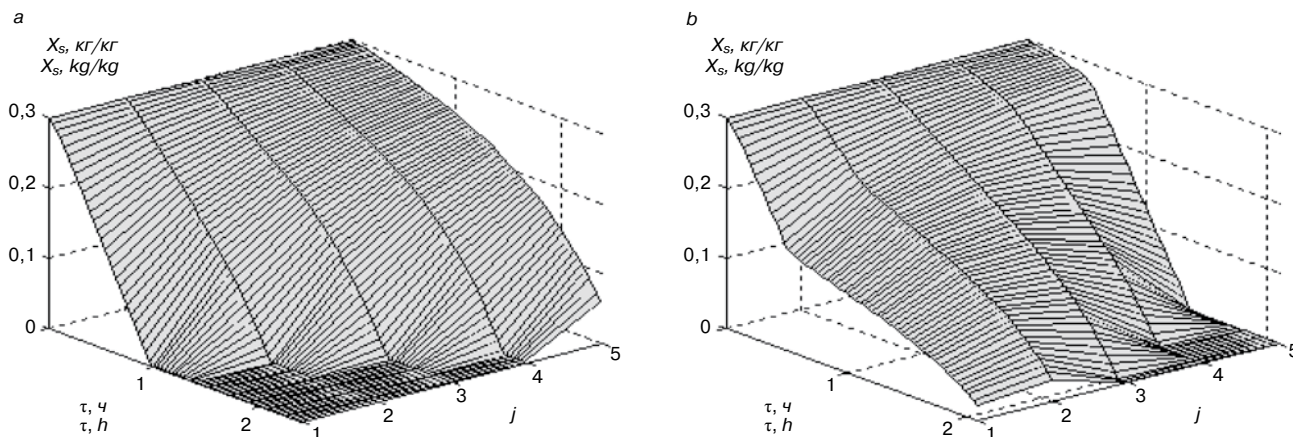


Рис. 4. Эволюция распределения влагосодержания при сушке без реверса (а) и с однократным реверсом при 0,5 ч (b)
 Fig. 4. Evolution of moisture content distribution at drying without reverse (a) and with one-time reverse after 0.5 hour (b)

При обратном ходе движение газа контролируется матрицей P_{G2} , которая получается из матрицы P_{G1} путем ее поворота по часовой стрелке на 180° , а величины ΔW_f^k (18) и ΔQ_f^k (19) приписываются ячейке с номером n .

Неравномерность распределения влаги по длине материала в первом приближении можно оценить величиной:

$$z^k = (X_{smax}^k - X_{smin}^k) / X_{s0}, \quad (20)$$

где X_{smax}^k и X_{smin}^k — максимальное и минимальное влагосодержание в материале в k -м временном состоянии.

Приведенные равенства (1)–(20) вместе с привлекаемыми теоретическими или эмпирическим зависимостями для теплофизических свойств материала и газа дают полное описание кинетики распределенного процесса сушки листового материала, в том числе при реверсивной подаче газа.

Приведенный ниже пример расчета реверсивной сушки выполнен для листа древесины (осина) единичной ширины длиной 2 м и толщиной 25 мм с теплопроводностью сухого материала $0,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{К})$ и коэффициентом теплопроводности $3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ при его начальном влагосодержании $0,3 \text{ кг}/\text{кг}$. Скорость сушильного агента на входе составляла $1,5 \text{ м}/\text{с}$ при температуре 80°C и влагосодержании $0,005 \text{ кг}/\text{кг}$. Для расчета использована цепь из пяти ячеек. Число временных переходов N определялось из условия достижения средней влажности в материале, равной $0,01 \text{ кг}/\text{кг}$.

На рис. 2 показано изменение неравномерности содержания влаги Z при однократном реверсе, включаемом в различные моменты времени (время переключения отмечено кружками). Расчеты показывают, что переход к реверсивной подаче газа сокращает время сушки на 12–16%, но неравномерность распределения содержания влаги меняется довольно значительно. Из графиков следует, что наименьшая максимальная неравномерность достигается при реверсе через 0,5 ч с начала процесса, когда неравномерность снижается почти в два раза.

На рис. 3 представлены данные с двукратным реверсом, когда наилучшее время переключения составляет 0,45 и 1,15 ч. Переход от однократного реверса к двукратному снижает неравномерность меньше, чем переход от проточного режима к однократному реверсу. Выигрыш составляет около 17%.

На рис. 4 проиллюстрирована эволюция распределения влагосодержания в материале при отсутствии и наличии однократного реверса газа. Из графиков видно, что сушка без реверса весьма неравномерна в продольном направлении. Причина этого очевидна: в конец ли-

$$\Delta Q_f^k = G_{g0} t_{g0} \Delta \tau (c_g + c_v X_{g0}) / (1 + X_{g0}), \quad (19)$$

where: G_{g0} is the gas flow rate; X_{g0} is the initial moisture content in it; t_{g0} is the initial gas flow temperature; c_g is the heat capacity of dry gas; c_v is the heat capacity of water vapor.

At the reverse current flow the gas motion is controlled by the matrix P_{G2} , which can be obtained from the matrix P_{G1} by means of its 180° clockwise rotation, and the values ΔW_f^k (18) and ΔQ_f^k (19) must be assigned to the cell n .

The non-homogeneity of moisture distribution over material length can be estimated by the value:

$$z^k = (X_{smax}^k - X_{smin}^k) / X_{s0}, \quad (20)$$

where: X_{smax}^k and X_{smin}^k is the maximum and minimum moisture content at the k -th state.

The above equations together with involved theoretical or empirical relationships to calculate thermophysical properties of material and gas provided the complete description of the distributed process of sheet material drying including the case of reversible gas supply.

The presented below computational example is done for wooden sheet (aspens) of the length 2 m and thickness 25 mm with the heat conduction coefficient (for dry wood) $0.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{K})$ and moisture conduction coefficient $3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ at its initial moisture content $0.3 \text{ kg}/\text{kg}$. The gas flow at the inlet had the temperature 80°C and the moisture content $0.005 \text{ kg}/\text{kg}$, its velocity was $1.5 \text{ m}/\text{s}$. The chains of 5 cells each were used. The number of time transitions N was determined from the condition of reaching the average moisture content in the material $0.001 \text{ kg}/\text{kg}$.

Fig. 2 illustrates variation of the moisture content non-homogeneity Z for one-time reverse when the gas flow direction is switched at different moments of time (the time of switch is marked by circles). Calculations show that usage of the reversible gas supply allows decreasing of the drying time on 12–16% only but the non-homogeneity of moisture content distribution changes considerably. It follows from the graphs that the smallest maximum non-homogeneity is being reached at the reverse after 0.5 hours after the process begins when the non-homogeneity become almost 2 times as little.

Fig. 3 is related to the double-ply reverse with the best switch times are 0.45 and 1.15 hours. Transition from the one-time reverse to the double-ply one decreases the non-homogeneity less than transition from the direct current flow to the one-time reverse. The gain is about 17%.

Fig. 4 illustrates the evolution of moisture content distribution at absence of the reverse and presence of one-time reverse. It can be seen from the graphs that drying without reverse is rather non-homogeneous in longwise direction. The reason of this is obvious: the end of the sheet contacts with strongly

ста попадает заметно увлажненный и охлажденный газ, что сразу заметно сказывается на движущей силе влагопереноса. При наличии реверса сушка идет значительно равномернее по длине листа.

Таким образом, предложенная ячеечная математическая модель позволяет рассчитывать кинетику тепло-массообмена при сушке листового материала параллельным ему потоком газа, а также выполнять расчетную оценку возможных путей совершенствования процесса. В частности, показано, что переход к сушке с реверсом газа позволяет значительно снизить неравномерность влагосодержания в материале в течение процесса.

Список литературы

1. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Сажин Б.С., Сажин В.Б. Научные основы техники сушки. М.: Наука, 1997. 448 с.
3. Лыков А.В. Тепло-массообмен: Справочник. М.: Энергия, 1978. 480 с.
4. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. Учебное пособие. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
5. Шестаков Н.И., Аксенчик К.В. Методика расчета термо- и влагонапряженного состояния бетонных плит, подвергаемых тепловлажностной обработке // *Строительные материалы*. 2012. № 11. С. 77–80.
6. Федосов С.В., Елин Н.Н., Мизонов В.Е., Порошин Н.Р. Нелинейная ячеечная модель взаимосвязанного тепловлагопереноса в ограждающей конструкции с внутренним источником влаги // *Строительные материалы*. 2011. № 8. С. 22–24.
7. Мизонов В.Е., Якимичев П.В., Зайцев В.А., Елин Н.Н. Моделирование контактного утилизатора теплоты отработавшего сушильного агента // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2011. Т. 54. Вып. 10. С. 127–129.
8. Mizonov V., Yelin N., Yakimychев P. A Cell model to describe and optimize heat and mass transfer in contact heat exchangers. *Energy and Power Engineering*. 2011. No. 3, pp. 144–149.

cooled and moisture gas that immediately reflects on the moving force of moisture transfer. At the presence of reverse the drying is much more homogeneous along the sheet length.

Thus, the proposed mathematical model allows calculating the kinetics of heat and mass transfer for drying sheet materials by a parallel gas flow and searching for ways to improve the process. In particular, it is shown that transition to drying with gas flow reverse allows decreasing the non-homogeneity of moisture content distribution during the process.

References

1. Lykov A.V. *Teoriya syshki [Theory of Drying]*. Moscow: Energiya. 1968. 472 p.
2. Sazhin B.S., Sazhin V.B. *Nauchnye osnovy tekhniki syshki [Scientific foundations of drying technology]*. Moscow: Nauka. 1997. 448 p.
3. Lykov A.V. *Teplomassoobmen: spravochnik [Heat and mass exchange: handbook]*. Moscow: Energiya. 1978. 480 p.
4. Lykov A.V. *Teplo- i massoobmen v protsessakh syshki. Uchebnoe posobie [Heat and mass exchange in processes of drying. Manual]*. Moscow: Gosenergoizdat. 1956. 464 p.
5. Shestakov N.I., Aksenich K.V. Method of calculation of thermostressed and moisturestressed state of concrete flagstones during heat and humidity treatment. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2012. No. 11, pp. 77–80. (In Russian).
6. Fedosov S.V., Yelin N.N., Mizonov V.E., Poroshin N.R. A non-linear cell model of interconnected heat and moisture transfer in building envelop with internal source of moisture. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2011. No. 8, pp. 22–24. (In Russian).
7. Mizonov V.E., Yakimychев P.V., Zaitsev V.A., Yelin N.N. Modeling of contact heat utilizer of exhaust drying agent. *Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2011. Vol. 54. Iss. 10, pp. 127–129. (In Russian).
8. Mizonov V., Yelin N., Yakimychев P. A cell model to describe and optimize heat and mass transfer in contact heat exchangers. *Energy and Power Engineering*. 2011. No. 3, pp. 144–149. (In Russian).

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

В издательстве «Стройматериалы» вы можете приобрести специальную литературу

Книга «Защита деревянных конструкций»

Автор – А.Д. Ломакин

Рассмотрены вопросы конструкционной и химической защиты деревянных конструкций, используемых в малоэтажном домостроении, при строительстве зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения, в том числе, с химически агрессивной средой, а также открытых сооружений (автодорожных и пешеходных мостов, опор ЛЭП и др.). Освещены вопросы защиты от эксплуатационных воздействий и возгорания несущих конструкций из клееной древесины и ЛВЛ и приведено краткое описание наиболее эффективных средств и способов их защиты. Описаны методы оценки защитных свойств покрытий для древесины, методика и результаты натуральных климатических испытаний покрытий на образцах и фрагментах конструкций. Приведены методика и результаты мониторинга влажностного состояния несущих клееных деревянных конструкций в процессе эксплуатации.

Монография «Производство деревянных клееных конструкций»

Автор – заслуженный деятель науки России, д-р техн. наук Ковальчук Л.М.

В книге рассмотрены основные вопросы технологии изготовления ДКК, показаны области их применения, описаны материалы для их изготовления. Особое внимание уделено вопросам оценки качества, методам испытаний, приемке и сертификации клееных конструкций. В книге приведен полный перечень отечественных и зарубежных нормативных документов, регламентирующих производство и применение ДКК



Для приобретения специальной литературы обращайтесь
в издательство «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»

Тел./факс: (499) 976-22-08, 976-20-36 E-mail: mail@rifsm.ru

Г.С. СЛАВЧЕВА, д-р техн. наук (gslavcheva@yandex.ru)

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84)

Структурные факторы обеспечения морозостойкости цементных пенобетонов

Для макропористых бетонов предложена обобщенная трактовка механизма морозного разрушения с обоснованием критериальных для его регулирования параметров структуры. Представлены результаты дилатометрических исследований цементных пенобетонов, позволивших выявить взаимосвязь параметров их структуры с мерой деформирования материала при замораживании водонасыщенных образцов.

Ключевые слова: пенобетоны, структура, морозостойкость, дилатометрия.

G.S. SLAVCHEVA, Doctor of Sciences (Engineering) (gslavcheva@yandex.ru)

Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering (84, 20-letija Oktjabrja Street, 394006, Voronezh, Russian Federation)

Structural Factors Ensuring the Frost Resistance of Cement Foam Concretes

For macro-porous concretes, a generalized interpretation of the mechanism of frost destruction with the substantiation of structure parameters criterial for its regulatory is proposed. Results of dilatometric studies of cement foam concretes, which revealed the interrelationship of the parameters of their structure with the measure of deformation of the material during the freezing of water-saturated samples, are presented.

Keywords: foam concretes, structure, frost resistance, dilatometry.

Обоснование факторов повышения морозостойкости цементных пенобетонов основывается на анализе физических явлений морозного разрушения как следствие процесса накопления повреждений в увлажненном материале при воздействии на него среды с циклически меняющейся отрицательной и положительной ее температурой, приводящих к износу материала.

Согласно существующим классическим (А.С. Беркман, И.Г. Мельникова. Структура и морозостойкость строительных материалов. М.: Госстройиздат. 1962. 164 с.; Г.И. Горчаков. Состав, структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат. 1976. 144 с.) и современным [1–5] представлениям о механизме морозного разрушения, а также предложенной Е.М. Чернышевым и развиваемой автором его трактовке [6, 7], накопление повреждений является результатом совокупности явлений (гидростатическим давлением воды при заперении ее в замкнутом объеме образующимся льдом; гидравлическим давлением воды при отжати ее льдом от зоны льдообразования в поры), связанных с преобразованием жидкой фазы в криофазу (льдофазу) в объеме материала. Ощутимо кристаллизационное, гидростатическое и гидравлическое давление может проявляться при предельных или близких к ним значениях наполнения пор материала водой. И в связи с этим необходимым условием развития деструкции в результате давления льдообразования и сопутствующих ему указанных выше гигромеханических эффектов считается наличие критической степени насыщения пор материала водой, равной 91,7%.

Во всех процессах морозной деструкции определяющее место принадлежит структурным характеристикам материала, которые и задают интенсивность и меру развития всех процессов при замораживании, а тем самым скорость и меру морозного разрушения. Критериальным для развития морозной деструкции является фактор температуры перехода жидкой фазы в криофазу (температуры замерзания воды в материале), которая зависит от силы связи воды со структурой материала, предопределяемой адсорбционной активностью поверхности твердой фазы (характеризуется теплотой смачивания $q_{\text{тв.ф}}$), сродством жидкой фазы к твердой фазе (характеризуется краевым углом смачивания θ), распределением объема порового пространства по радиусу пор $dr_{\text{пор}}/dV_{\text{пор}}$ (характеризуется средним эквивалентным радиу-

сом пор r_3). В зависимости от структуры материала значение температуры замерзания воды в нем может находиться в интервале $0^\circ\text{C} - -70^\circ\text{C}$. Для макропористых бетонов значимым фактором повышения морозостойкости является создание резервного (свободного от жидкости) объема макропористого пространства в материалах, в который может гидравлически отжиматься жидкая фаза при льдообразовании в заполненных водой капиллярных порах. И это в основе своей также подразумевает регулирование структурных характеристик материала, а на этой основе возможность управления гигромеханическими процессами при замораживании-оттаивании и в итоге интенсивностью морозной деструкции.

Таким образом, механика процессов проявления и реализации морозостойкости строительных материалов в связи с их структурой оказывается многоплановой с точки зрения принципов и возможностей управления. Диапазон этих возможностей иллюстрируется данными, полученными автором применительно к цементным пенобетонам с варьируемыми структурами твердой фазы и порового пространства.

Морозостойкость бетонов связана с их исходным влажностным состоянием, поэтому с практической точки зрения целесообразно характеризовать влажностное состояние материалов, наблюдаемое: а) при длительном пребывании их в среде насыщенного водяного пара ($p/p_s \approx 1$); б) непосредственно после окончания технологического процесса; в) при их водонасыщении. Такие варианты влажностного состояния бетонов соответствуют наиболее неблагоприятным ситуациям и условиям, в которых они могут оказаться при эксплуатации.

Показано, что посредством регулирования параметров состава и структуры цементного микробетона (табл. 1), рассматриваемого в качестве матрицы пенобетонов, можно многократно изменять степень заполнения пор жидкой фазой и соответственно резервный объем порового пространства (табл. 2).

Цементный микробетон без добавок и наполнителей (рассматриваемый в качестве эталона) обладает такой структурой, что его поры в каждом из рассматриваемых вариантов влажностного состояния оказываются в значительной мере или полностью заполненными водой. Изменение структуры в направлении увеличения сред-

Таблица 1

Параметры структуры «модельных» образцов цементного микробетона, принимаемых в качестве матрицы цементных пенобетонов

Модели структуры микробетона		Эталон	Матрицы поризованных бетонов		
Характеристика состава	В/Ц	0,4	0,4	0,8	1
	Вид наполнителя	Без наполнителя	Пылевидный кварцевый песок	Молотый кварцевый песок	Зола-унос ТЭЦ
	$S_{уд}$, м ² /кг		60	15	350
	Теплота смачивания водой, кДж/кг		0,71	0,97	1,65
	Массовое соотношение цемент-наполнитель		1:1,75	1:1,5	1:1,5
Параметры структуры	Степень гидратации цемента, %	82	74	79	90
	$V_{ц.в}$, м ³ /м ³	0,43	0,18	0,2	0,23
	$V_{зц}$, м ³ /м ³	0,19	0,06	0,06	0,03
	$V_{мн}$, м ³ /м ³		0,54	0,48	0,43
	$V_{п}$, м ³ /м ³	0,33	0,22	0,26	0,31
	$S_{тв.ф}$, м ² /г	82,2	7,5	22	70,2
	$q_{тв.ф}$, кДж/кг	15,1	<2	<2	6,1
	Содержание пор радиусом $r_3 < 20$ нм, % от общего объема пор	24	10	22	30

Примечание. $V_{ц.в}$ – объем цементирующего вещества; $V_{зц}$ – объем остаточных зерен цемента; $V_{мн}$ – объем микронаполнителя; $V_{п}$ – объем пор; $S_{тв.ф}$ – удельная площадь поверхности; $q_{тв.ф}$ – удельная поверхностная энергия твердой фазы; r_3 – эквивалентный радиус пор.

Таблица 2

Показатели влажностного состояния цементного микробетона и пенобетона средней плотности 800 кг/м³

Характеристика составов микробетона и поризованного бетона		Показатели влажностного состояния					
		после хранения в среде с $p/p_0=1$		после твердения		после водонасыщения	
		$V_{жф}/V_{пор}$	$V_{рп}$	$V_{жф}/V_{пор}$	$V_{рп}$	$V_{жф}/V_{пор}$	$V_{рп}$
Для микробетона							
Без наполнителей	В/Ц=0,4	0,27	0,73	0,55	0,45	1,14	0
	С наполнителями	На молотом песке	0,31	0,69	0,34	0,66	0,85
	На золе уноса	0,53	0,47	0,57	0,43	1	0
Для пенобетона							
На немолотом песке	0,06	0,94	0,11	0,89	0,17	0,83	
На молотом песке	0,07	0,93	0,23	0,77	0,37	0,63	
На золе-уносе	0,11	0,89	0,33	0,67	0,5	0,5	

Примечание. $V_{жф}/V_{пор}$ – степень заполнения пор водой, м³/м³; $V_{рп}=1 - V_{жф}/V_{пор}$ – резервный объем пор, не заполненных водой, м³/м³.

ного радиуса пор при одновременном снижении удельной поверхности и поверхностной энергии твердой фазы за счет введения грубодисперсных, относительно малоактивных по отношению к воде наполнителей (табл. 1) сопровождается понижением степени заполнения пор водой ($V_{жф}/V_{пор}$), возрастанием величины не заполненного водой резервного объема пор. Подчеркнем, что для микробетона, полученного с применением кварцевого песка, даже после его водонасыщения этот показатель составляет $V_{жф}/V_{пор}=0,85$, что ниже критического значения $V_{жф}/V_{пор}=0,91$.

Фиксируемая для микробетона связь параметров его влажностного состояния с особенностями структуры закономерно проявляет себя в пенобетонах, где соответствующий вид микробетона используется в качестве матричного материала. Для бетона на кварцевом песке и золе-уносе одинаковой средней плотности при влажностном состоянии, достигаемом после твердения и после выдерживания в среде с $p/p_0 \approx 1$, имеет место 1,5-кратная разница в степени заполнения общего объ-

ема пор и микропор водой (табл. 2). В макропористом бетоне при обычном водонасыщении его микропоры полностью заполняются водой. Однако с учетом объема макропор в материале всегда есть незанятый водой, резервный объем порового пространства. Его величина зависит при равной средней плотности бетона от особенностей структуры материала мембран. Выполненные исследования показали, что резервный объем порового пространства возрастает для бетонов равной средней плотности по мере понижения сродства материала перергодока к воде, уменьшения относительного объема микропор.

Однако повышенные значения исходной степени насыщения пор материала водой или, напротив, пониженные их значения еще не дают оснований прогнозировать по ним соответственно более низкую или более высокую его морозостойкость. При охлаждении материала исходное влажностное его состояние и соответствующая ему величина резервного объема пор не сохраняются. В силу развития процесса термоградиент-

Таблица 3

Деформации цементного микробетона, макропористых бетонов (пенобетонов) при температуре 0 – -60°C

Вид материала	Характеристика состава материала		Приведенные деформации $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{вод}} - \varepsilon_{\text{сух}}$, мм/м при температуре		
			0 – -10°C	-20 – -30°C	≤50°C
Цементный микробетон	Без наполнителей и добавок	В/Ц=0,4	0,3	0,15	0,5–0,6
		На молотом песке	0,09	нет	0,5–0,6
	С наполнителями	На золе-уносе	нет	0,17	0,3–0,4
		На немолотом песке	нет	0,15	0,4–0,5
Цементный пенобетон	На немолотом кварцевом песке D800		0,28	0,19	0,2–0,3
	На молотом кварцевом песке D800		0,13	нет	0,3–0,5
	Микрoзернистый на золе-уносе D800		0,12	нет	0,1–0,2

ной миграции влаги в материале с относительно меньшей исходной степенью заполнения пор водой может в зоне его охлаждения возникнуть ситуация критического водонасыщения. В материале же с большим исходным водосодержанием такая ситуация, к примеру, может и не появиться, и он в результате этого окажется потенциально более морозостойким. Как следует из изложенного выше понимания механизма и факторов морозного разрушения, повышенную степень заполнения пор водой следует считать необходимым, но недостаточным условием разрушения при замораживании. Определяющее значение будет иметь вероятная температура замерзания воды в порах и мера деформирования материала при замораживании [8, 9], являющаяся следствием и показателем возможного проявления кристаллизационного давления при льдообразовании.

Сравнительные исследования деформирования сухих и водонасыщенных образцов цементного микробетона и соответствующих видов поризованных бетонов при замораживании позволили охарактеризовать ряд закономерностей влияния структуры материала на развитие процесса льдообразования и соответствующее этому формирование напряженного состояния.

Характер деформирования водонасыщенного цементного микробетона при охлаждении (рис. 1) свидетельствует, что в первый период воздействия среды с отрицательной температурой наблюдаемое уменьшение объема материала является следствием температурного деформирования его твердой фазы. Данные объемные изменения могут уже в этот период в определенной мере перекрываться увеличением объема жидкой фазы при переходе ее в лед. В последующем деформации материала оказываются связанными в основном с развитием процесса льдообразования. При этом деформированное и напряженное состояние водонасыщенного микробетона при замораживании и соответствующие эффекты на кривых деформирования обуславливаются особенностями его структуры.

Для цементного микробетона без добавок и наполнителей отличия в характере деформирования сухих и водонасыщенных образцов определяются параметрами порового пространства. Несмотря на то что в водонасыщенном состоянии поровое пространство микробетона полностью заполнено жидкой фазой, в цементном микробетоне, поровое пространство которого характеризуется двумодальным распределением пор по их радиусам (например, при В/Ц= 0,4) по мере охлаждения материала эффект увеличения объема в результате льдообразования достаточно четко наблюдается в интервале температуры 0 – -10°C и -50 – -60°C (рис. 1, а).

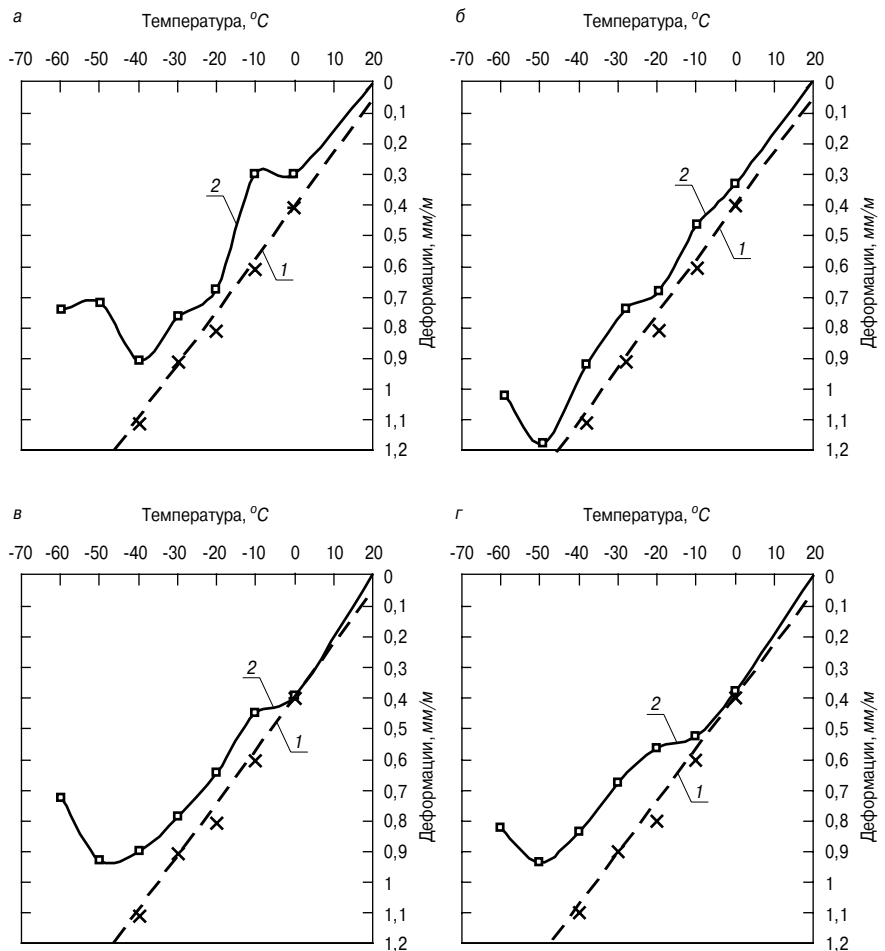


Рис. 1. Дилатометрические эффекты при замораживании сухих и водонасыщенных образцов цементного микробетона на различных видах наполнителя: а – без наполнителя (эталон); б – на золе-уносе; в – на молотом кварцевом песке; г – на немолотом кварцевом песке; 1 – сухие образцы; 2 – водонасыщенные образцы

Таблица 4

Результаты испытаний пенобетона на морозостойкость

Вид бетона	Марка по средней плотности	Показатели после 35 циклов замораживания-оттаивания		Марка по морозостойкости
		Потеря массы, %	Потеря прочности, %	
Мелкозернистый (на немолотом песке) $M_k=1,2$	D800	12,1	26,2	<F25
	D1000	0,79	10,8	F25
Микрозернистый (на молотом песке)	D800	3,9	13	F35
	D1000	нет	8	F35
Микрозернистый (на золе-уносе)	D800	2,1	11	F50
	D1000	Нет	8,1	F50

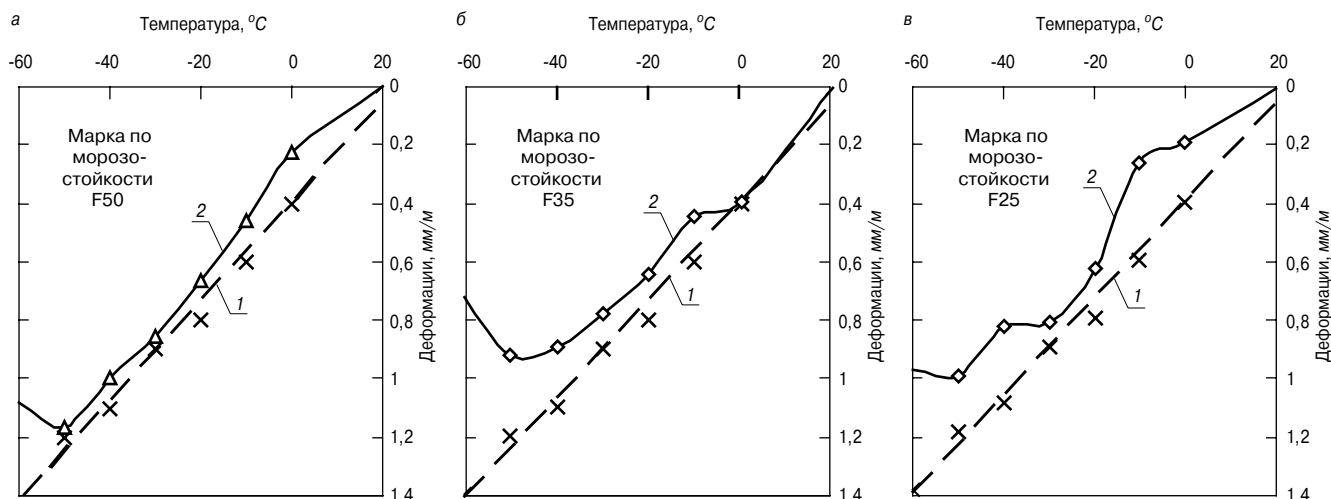


Рис. 2. Дилатометрические эффекты при замораживании сухих и водонасыщенных образцов различных видов цементного пенобетона ($\rho=800 \text{ кг/м}^3$): а – на золе-уносе; б – на молотом кварцевом песке; в – на немолотом кварцевом песке: 1 – сухие образцы; 2 – водонасыщенные образцы

Для цементного микробетона с наполнителями, рассматриваемого в качестве матричного материала цементного поризованного бетона, также характерны два температурных диапазона: в одном происходит компенсация температурных деформаций уменьшения объема, в другом – деформации расширения при замерзании воды. Начальная температура льдообразования определяется степенью сродства к воде наполнителя. Для серий микробетона на кварцевом песке различной дисперсности (рис. 1, в, г) компенсация температурных деформаций уменьшения объема наблюдается при температуре $-10 - -20^\circ\text{C}$. И это закономерно связано со структурой пористости и активностью их поверхности по отношению к воде. В поровом пространстве пор микробетона данных серий доля пор $r_3 \leq 20 \text{ нм}$ не превышает 20%, а теплота смачивания поверхности твердой фазы характеризуется значением менее 2 кДж/кг (табл. 1). Для микробетона на золе-уносе, который характеризуется повышенной теплотой смачивания поверхности твердой фазы ($q=6,1 \text{ кДж/кг}$) и содержанием пор $r_3 \leq 20 \text{ нм}$ до 30% от их общего объема, первый эффект расширения (рис. 1, б) наблюдается при температуре $-20 - -30^\circ\text{C}$.

По данным авторских дилатометрических исследований установлено, что при замораживании макропористых бетонов (пенобетонов) характер их деформирования соответствует характеру деформирования соответствующего вида микробетона (рис. 2). Снижение температуры замерзания воды также фиксируется при увеличении силы взаимодействия структуры с водой за счет повышения удельной поверхностной энергии твердой фазы и уменьшения радиуса микропор межпорово-

го материала. Вследствие этого опасный с точки зрения морозостойкости материала интервал температуры его замораживания сдвигается в область более низких ее значений. Для микрозернистого пенобетона с повышенной теплотой смачивания поверхности твердой фазы (например, на золе-уносе) существенные деформации расширения начинают проявляться при $t < -50^\circ\text{C}$, а для мелкозернистого пенобетона на кварцевом песке такие деформации фиксируются при $t = -10; -20; -50^\circ\text{C}$. И это несмотря на снижение величины не заполненного водой резервного объема пор в материале на золе-уносе.

Таким образом, дилатометрические исследования показывают, что разность относительных деформаций при замораживании водонасыщенных и сухих образцов (величина приведенных деформаций $\Delta\epsilon = \epsilon_{\text{вод}} - \epsilon_{\text{сух}}$) при охлаждении в диапазоне температур $0 - -60^\circ\text{C}$ растет (табл. 3) по мере уменьшения содержания нанопор в материале и снижения запаса избыточной поверхностной энергии твердой фазы. По отношению к другим сериям микробетона и бетона наибольшая величина приведенных деформаций характерна для микробетона на немолотом кварцевом песке и соответствующего вида пенобетона, несмотря на наличие свободного от жидкой фазы объема пор.

Полученные результаты исследований дают основание прогнозировать, что повышение сопротивления бетонов морозному разрушению может быть осуществлено при условии модифицирования его порового пространства в направлении уменьшения среднего эффективного радиуса пор. Твердая фаза должна при этом характеризоваться возможно более высоким сродством

к воде, что наряду с уменьшением радиуса пор определяет снижение степени замерзания воды в материале. И это подтверждается результатами стандартных испытаний на морозостойкость рассмотренных разновидностей пенобетонов. Согласно их результатам морозостойкость бетона средней плотности 800–1000 кг/м³ на золе-уносе оценивается маркой F50, на молотом кварцевом песке – F35, на песке естественной гранулометрии – не более F25 (табл. 4).

Таким образом, определяющим фактором морозной деструкции является не критическая исходная степень водонасыщения материала, а мера «замерзаемости» воды в нем. Проявление разрушающего действия замораживания-оттаивания определяется структурой материала. Снижение уровня морозной деструкции

обеспечивается путем направленного формирования структуры порового пространства и твердой фазы поризованных бетонов и соответствующего регулирования при этом температуры замерзания воды в его порах и величины соответствующих деформаций и напряжений при льдообразовании. С точки зрения повышения потенциала морозостойкости для условий эксплуатации изделий с температурой не ниже 25–30°C целесообразно формировать микропоровое пространство межпоровых перегородок с преимущественным содержанием пор радиусом менее 20 нм и твердую фазу с величинами удельной теплоты смачивания твердой фазы более 10 кДж/кг, что для пенобетонов обеспечивается использованием тонкодисперсных наполнителей с высоким сродством их поверхности к воде.

Список литературы

1. Гузеев Е.А., Пирадов К.А., Мамаев Т.Л. Оценка морозостойкости бетона по параметрам механики разрушения // *Бетон и железобетон*. 2000. № 3. С. 26–27.
2. Александровский С.В., Александровский В.С. Базовая модель теории промерзания влажных пористых тел // *Бетон и железобетон*. 2005. № 6. С. 20–21.
3. Добшиц Л.М. Физико-химическая модель разрушения бетонов при попеременном замораживании-оттаивании // *Вестник гражданских инженеров*. 2009. № 3 (20). С. 104–110.
4. Зоткин А.Г. Воздушные поры и морозостойкость бетона // *Технологии бетонов*. 2011. № 5–6. С. 18–21.
5. Леонович С.Н., Зайцев Ю.В., Пирадов К.А. Физическая модель кинетики разрушения бетона при тепловлажных воздействиях // *Вестник гражданских инженеров*. 2014. № 1 (42). С. 34–36.
6. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Морозное разрушение и морозостойкость строительных материалов: современная трактовка механизма и факторов управления // *Вестник отделения строительных наук РААСН*. Вып. 9. Белгород, 2005. С. 447–459.
7. Славчева Г.С., Чернышов Е.М. Влияние структуры высокопрочных модифицированных бетонов на dilatометрические эффекты при их замораживании // *Вестник инженерной школы ДВФУ. Строительные материалы и изделия*. 2015. № 1 (22). С. 63–70.
8. Шейнин А.М., Эккель С.В. О применении dilatометрического метода для прогнозирования морозостойкости дорожного бетона // *Строительные материалы*. 2004. № 12. С. 50–51.
9. Дикун А.Д., Фишман В.Я., Дикун В.Н., Нагорняк И.Н., Алексеев А.В. Практика применения ускоренного dilatометрического метода определения морозостойкости бетонов по ГОСТ 10060.3–95 // *Строительные материалы*. 2009. № 4. С. 97–101.

References

1. Guzeev E.A., Piradov K.A., Mamaev T.L. Evaluation of frost resistance of concrete in the parameters of fracture mechanics. *Beton i zhelezobeton*. 2000. No. 3, pp. 26–27. (In Russian).
2. Aleksandrovsii S.V. Aleksandrovsii V.S. Basic model theory of freezing wet porous bodies. *Beton i zhelezobeton*. 2005. No. 6. pp. 20–21. (In Russian).
3. Dobshits L.M. Physico-chemical model of the fracture of concrete under alternate maintenance-thawing. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2009. No. 3 (20), pp. 104–110. (In Russian).
4. Zotkin A.G. The air pores and frost resistance of concrete. *Tekhnologii betonov*. 2011. No. 5–6, pp. 18–21. (In Russian).
5. Leonovich S.N., Zaitsev Yu.V., Piradov K.A. The physical model of the kinetics of destruction of concrete in the heat and humidity effects // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2014. No. 1 (42), pp. 34–36 (In Russian).
6. Chernyshov E. M. Slavcheva, G. S. Frost destruction and frost resistance of building materials: a modern interpretation of the mechanism and management factors. *Bulletin of the Department of construction Sciences RAASN*. Vol. 9. Belgorod, 2005, pp. 447–459. (In Russian).
7. Slavcheva G.S., Chernyshov E.M. Influence of structure of high strength modified concrete on dilatometric effects when freezing. *Vestnik inzhenernoi shkoly DVFU. Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2015. No. 1 (22), pp. 63–70. (In Russian)
8. Sheinin A.M., Ekkel' S.V. On the application of dilatometric method for predicting the frost resistance of concrete road. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2004. No. 12, pp. 50–51. (In Russian).
9. Dikun A.D., Fishman V.Ya., Dikun V.N., Nagornyak I.N., Alekseev A.V. The practice of applying accelerated dilatometric method for determination frost resistance of concrete in accordance with GOST 10060.3–95. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 4, pp. 97–101. (In Russian).



Подписка на электронную версию журнала «Строительные материалы»®

<http://ejournal.rifsm.ru/>

УДК

С.И. ВАЙТКУС (saulius.vaitkus@vgtu.lt), канд. техн. наук, И.Я. ГНИП, канд. техн. наук

Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса (Научный институт «Термоизоляция») (Литва, 08217, Вильнюс, ул. Линкмяну, 28)

Исследование релаксации напряжения в полистирольном пенопласте в условиях одноосного сжатия с использованием математико-статистического планирования эксперимента

Представлены результаты экспериментальных исследований релаксации напряжения в условиях одноосного сжатия пенополистирольных изделий типов EPS 80/90/100/120 и EPS 150 при постоянной $\varepsilon_0=(1,2\pm 0,2)\%$, которая фиксировалась при удельной сжимающей нагрузке $\sigma_H(=0,35\cdot\sigma_{10\%})$, действующей перпендикулярно поверхности изделий. Методом математико-статистического планирования эксперимента получены модели оптимизации толщины образцов для определения коэффициента релаксации K_p в момент времени $t=8$ ч, коэффициента затухания уменьшения сжимаемости напряжения $K_{затух}$ и податливости при релаксации $I_p(t\rightarrow\infty)$. Приведена графическая интерпретация моделей: линии уровня зависимости коэффициента релаксации K_p в момент времени $t=8$ ч, коэффициента релаксационной стойкости $K_{затух}$ и податливости при релаксации I_p для $t\rightarrow\infty$. Для сопоставления на количественной основе экспериментальных значений податливости при релаксации в интервале постоянной деформации сжатия $\varepsilon_0=(1,2\pm 0,2)\%$ приведены уравнения линейной взаимозависимости между $I_p(t\rightarrow\infty)$ и $I_c(t_H=122$ сут). Для вычисления установившегося равновесного напряжения при релаксации предлагаются эмпирические формулы.

Ключевые слова: пенопласт полистирольный, длительное сжатие, планирование эксперимента, оптимальная толщина образцов, релаксация напряжения, податливость при релаксации, прогнозирование.

S.I. VAITKUS, Candidate of Sciences (Engineering) (saulius.vaitkus@vgtu.lt), I.J. GNIP, Candidate of Sciences (Engineering) Vilnius Gediminas Technical University (Scientific Institute «Insulation») (28, Linkmyanu Street, Vilnius, 08217, Lithuania)

Research of expanded polystyrene (EPS) stress relaxation under uniaxial loading conditions using statistical design method of experiments

The results of stress relaxation under uniaxial compression experimental research of expanded polystyrene products with the types of EPS 80/90/100/120 and EPS 150 at a constant $\varepsilon_0=(1,2\pm 0,2)\%$, that was fixed at a specific compressive load $\sigma_c(=0,35\cdot\sigma_{10\%})$ acting perpendicular to the surface of products, are presented. The method of mathematical and statistical experimental design optimization models taking into account the thickness of specimens is proposed to determine the relaxation coefficient K_p at the time $t=8$ h, the attenuation factor to reduce the compressive stress K_{atten} , and relaxation compliance $J_p(t\rightarrow\infty)$. The graphical interpretation of the models is presented: depending level line of the relaxation coefficient K_p at the time $t=8$ h, relaxation resistance coefficient K_r and compliance with the relaxation J_p to $t\rightarrow\infty$. On the basis of quantitative experimental values of compliance $J_p(t\rightarrow\infty)$ with the relaxation in the range of permanent compressive strain $\varepsilon_0=(1,2\pm 0,2)\%$, the linear equations of interdependence between $J_p(t\rightarrow\infty)$ and $J_c(t_H=122$ days) are given. Empirical equations for the calculation of the established equilibrium stress at a relaxation are offered.

Keywords: expanded polystyrene (EPS), long-term compression, experimental design, optimisation of specimens thickness, stress relaxation, relaxation compliances, prediction.

Современные потребности в эффективных строительных материалах определяют интенсивное использование пенополистирольных (EPS)¹ изделий. При применении полистирольного пенопласта в ограждающих конструкциях является актуальным совершенствование методов их расчета с детальным учетом прочности и деформируемости пенополистирольного слоя. Одним из основных видов напряженного состояния EPS изделий, применяемых в качестве теплоизоляционно-конструкционного материала, является сжатие, а его работоспособность определяет физические целесообразные характеристики.

В одном случае деформации не должны достигать нормируемой величины, т. е. работоспособности пенополистирола в условиях ползучести [1]. В другом — уменьшение во времени напряжения в деформируемом пенополистироле до допускаемой величины, общая деформация которого зафиксирована связями, т. е. работоспособность пенополистирола в условиях релаксации напряжения [2].

Исследования ползучести пенополистирольных изделий при постоянной сжимающей нагрузке в настоящее время проводятся согласно требованиям (EN 1316:2009 E (ГОСТ Р 56148—2014) и в соответствии

с ГОСТ Р EN 1606—2010. Сведений по исследованию релаксации напряжения в полистирольном пенопласте в литературе мало [3—6].

В настоящей работе выполнены исследования степени релаксации сжимающего напряжения при испытании пенополистирольных образцов разной толщины.

Целью выполненных исследований являлась оптимизация толщины образцов пенополистирольных плит разной прочности для определения максимально возможного напряжения, сохраняющегося в материале длительное время при постоянной деформации ε_0 , величину которой фиксировали при сжимающем напряжении $\sigma_H=0,35\cdot\sigma_{10\%}$ ².

Методика исследований. Экспериментальное исследование релаксации напряжения в полистирольном пенопласте при сжатии выполнено на плитах типов EPS 80, EPS 120 и EPS 150 плотностью 15—26 кг/м³, изготовленных одним и тем же производителем беспресовым способом — вспениванием в замкнутом объеме сырья в виде бисера (твердых гранул). В частности, применено для плит EPS 80 сырье NF 514 ($\varnothing 1,4$ —2,5 мм) фирмы STYROCHEM; для плит EPS 120 — сырье F 215N ($\varnothing 1$ —2 мм) фирмы BASF и для плит EPS 150 — сырье F295 ($\varnothing 1$ —2,3 мм) фирмы BASF.

¹ Вспенивающийся полистирол (expanded polystyrene (EPS)).

² Рекомендовано ГОСТ Р EN 1606 [4] как максимальное значение постоянного сжимающего напряжения при исследовании ползучести пенополистирольных изделий.

Экспериментальное исследование релаксации напряжения выполнено на образцах, нагруженных сжимающей нагрузкой в перпендикулярном направлении к поверхности плит, из которых их вырезали. Испытывали образцы квадратной формы со стороной $b=100$ мм и толщиной (высотой) d , равной 50, 75 и 100 мм (номинальные толщины плит). Размеры образцов измеряли в соответствии с ГОСТ Р ЕН 12085–2008, их плотность определяли согласно ГОСТ Р ЕН 1602–2008.

Для сравнительных оценок результатов исследования релаксации напряжения проводили испытания образцов на кратковременное сжатие согласно ГОСТ Р ЕН 826–2008.

Кратковременное сжатие проводили на компьютеризованной испытательной машине Н10КС (Hounsfield, Англия); скорость нагружения $0,1d \pm 25\%$ мм/мин (ГОСТ Р ЕН 826–2008), погрешность силоизмерения 1–11 Н. Точность измерения продольной деформации испытуемых образцов по перемещению траверсы составляла 0,01 мм, а погрешность ее поддержания в режиме $\varepsilon = \varepsilon_0 = const$ не более 0,02%. Длина мерной базы в выполняемых исследованиях равна начальной толщине (высоте) образца при удельной нагрузке 250 Па.

Для каждого испытанного образца на кратковременное сжатие рассчитана прочность на сжатие $\sigma_{10\%}$ [7].

При испытаниях на релаксацию напряжения оценивали уменьшение макронапряжения во всем образце. Последний в компьютеризованной испытательной машине Н10КС нагружали сжимающим напряжением $\sigma_n = 0,35 \cdot \sigma_{10\%}$ и фиксировали соответствующую деформацию ε_0 . В дальнейшем измеряли напряжение, необходимое для поддержания деформации $\varepsilon_0 = const$ как функцию времени. В результате получили графики зависимости напряжения от времени и оканчивали эксперимент при фиксированной начальной деформации $\varepsilon_0 = const$ по истечении времени $t=8$ ч.

Скорость нагружения (деформирования) образцов при исследовании релаксации напряжения изменяли от 0,65 до 0,95 мм/мин (соответственно их толщинам 50–100 мм) из условия, чтобы фиксируемая деформация ε_0 , соответствующая напряжению $0,35 \cdot \sigma_{10\%}$, была достигнута за время, равное 60 с^3 . Таким образом, принятые скорости нагружения образцов EPS при кратковременном сжатии в испытаниях на релаксацию напряжения в условиях сжатия и исследованиях ползучести при постоянной сжимающей нагрузке являются согласованными.

Исследования выполнены при температуре окружающей среды $23 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $50 \pm 5\%$.

Экспериментальные данные кратковременного сжатия образцов представлены зависимостью линейного вида, позволяющей с достаточной точностью находить количественные значения показателя прочности $\sigma_{10\%}$ пенополистирольных изделий (EN 1316:2009 Е (ГОСТ Р 56148–2014)):

$$\bar{Y}_x = b_0 + b_1 \cdot x, \quad (1)$$

где \bar{Y}_x – среднее значение результативного признака (исследуемый показатель $\sigma_{10\%}$); x – факторный признак (плотность пенополистирола ρ , прочность при сжатии $\sigma_{10\%}$); b_0, b_1 – постоянные коэффициенты, вычисляемые по экспериментальным данным методом наименьших квадратов [8].

В качестве меры рассеяния результатов наблюдений вокруг экспериментальной линии регрессии принято среднее квадратическое отклонение S_r .

³ Согласно ГОСТ Р ЕН 1606 при исследовании ползучести пенополистирольных плит начальную деформацию ε_0 рекомендуется измерять в момент времени 60 с от начала нагружения при длительности последнего 10 ± 5 с.

⁴ $K_{затух}$ – attenuation factor, K_{atten} .

⁵ Податливость при ползучести определяется как $I_c(t) = \frac{\varepsilon_c(t)}{\sigma_c}$ [1], при этом $\sigma_c = const$.

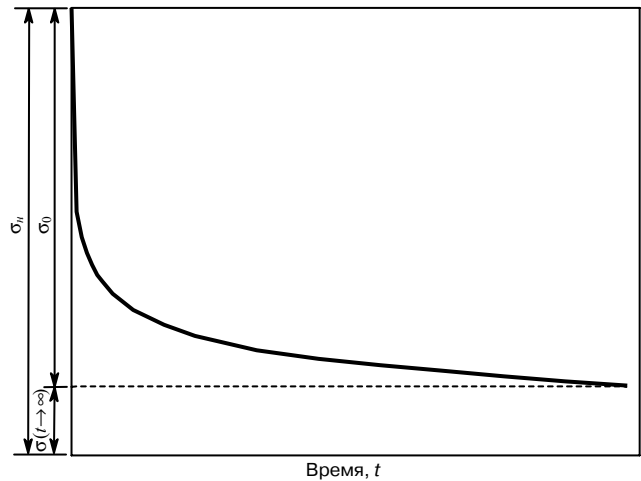


Рис. 1. Релаксационная кривая (схема)

Экспериментальные данные по релаксации напряжения в интервале времени $0 < t \leq 8$ ч аппроксимированы функцией Кольрауша [9, 10]:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-t^a} + \sigma(t \rightarrow \infty), \quad (2)$$

где $\sigma(t)$ – напряжение в момент времени t ; σ_0 – релаксирующая часть напряжения; $\sigma(t \rightarrow \infty)$ – установившееся значение напряжения; a – параметр, характеризующий релаксационные свойства полимерного материала.

Релаксационная кривая, описываемая уравнением (2), и обозначение величин, входящих в уравнение, представлены на рис. 1. Сравнение параметров уравнения (2), определенных при разных длительностях испытаний (2 и 6 ч), показывает [10], что в области $\sigma_n \leq 0,35 \cdot \sigma_{10\%}$ установившееся (равновесное) напряжение $\sigma(t \rightarrow \infty)$ и релаксирующая часть σ_0 практически одинаковы, т. е. на основании кратковременных опытов можно прогнозировать механическое поведение EPS на длительное время.

После получения уравнения (2) на начальное напряжение $\sigma_n = 0,35 \cdot \sigma_{10\%}$ последнее принимает вид в относительных величинах:

$$K_p = a_0 \cdot e^{-t^{a_1}} + a_2, \quad (3)$$

где K_p – коэффициент релаксации в момент времени t , равный $\frac{\sigma(t)}{\sigma_n}$; a_0, a_1, a_2 – постоянные параметры, характеризующие отношение $\frac{\sigma_0}{\sigma_n}$, релаксационные свойства полимерного материала и степень затухания уменьшения напряжения ($K_{затух}$)⁴.

Равновесное сжимающее напряжение количественно определяли также податливостью при релаксации⁵, являющейся только функцией времени:

$$I_r(t) = \frac{\varepsilon_0}{\sigma(t)}, \quad (4)$$

где $I_r(t)$ – относительная величина напряжения в момент времени t , необходимая для поддержания относительной деформации $\varepsilon_0 = const$, вызванной приложенным сжимающим напряжением; $\sigma(t)$ – напряжение в момент времени t ; t – время отсчета.

Планирование эксперимента. Исследования включали три выходных параметра: коэффициент релаксации K_p в фиксируемый момент времени $t=8$ ч, коэффициент затухания релаксации $K_{затух}$ и податливость при релак-

сацией $I_r(t \rightarrow \infty)$, а также два управляемых фактора – прочность EPS на сжатие $\sigma_{10\%}$ и толщина образца d .

По полному факторному эксперименту типа $N=n^k$, где n – количество уровней; k – число факторов, испытывали образцы из пенополистирольных плит EPS 80⁶, EPS 120 и EPS 150. Число опытов в этом исследовании составило $N=3^2=9$.

Из вырезанных образцов толщиной d , равной 50, 75 и 100 мм, делали экспериментальные выборки с близкими исходными значениями сжимающего напряжения $\sigma_{10\%}$ (по три образца для каждого опыта).

При проведении эксперимента значения управляемых факторов поддерживали на фиксируемом уровне по плану с переходом от натуральной системы к кодированной по формуле [11]:

$$x_j = \frac{\bar{x}_j - \bar{x}_{j(i)}}{I_j}, \quad (5)$$

где x_j – кодированное значение фактора; \bar{x}_j – натуральное⁷ значение фактора; $\bar{x}_{j(i)}$ – натуральное значение фактора основного уровня; I_j – интервал варьирования; j – номер фактора.

Основной уровень и интервал варьирования управляемых факторов приведены в табл. 1, а матрица планирования полного факторного типа 3^2 эксперимента – в табл. 2 (последние пять столбцов содержат результаты эксперимента). На рис. 2 приведены фиксируемые уровни прочности образцов $\sigma_{10\%}$ в натуральной системе (фактор x_1).

При длительном сжатии образцов, подобранных в соответствии с матрицей планирования, определяли следующие показатели:

- y_1 – коэффициент релаксации сжимающего напряжения K_p в фиксируемый момент времени $t=8$ ч;
- y_2 – коэффициент затухания уменьшения сжимающего напряжения $K_{затух}$ при $t \rightarrow \infty$;
- y_3 – податливость при релаксации I_r для $t \rightarrow \infty$.

Таблица 1

Характеристика	x_1 – прочность образцов EPS на сжатие, кПа	x_2 – толщина испытываемых образцов, мм
Основной уровень	128	75
Интервал варьирования	45	25
Верхний уровень	173	100
Нижний уровень	83	50

Таблица 2

№ опыта	x_1	x_2	y_1		y_2		$y_3, \text{МПа}^{-1}$
			\bar{y}_1^*	$S_{y_1} \cdot 10^2$	\bar{y}_2^*	$S_{y_2} \cdot 10^2$	$\bar{y}_3^{\text{проп}}$
1	-1	-1	0,852	0,6	0,8114	0,6388	0,605
2	0	-1	0,877	0,513	0,8446	0,3961	0,37
3	+1	-1	0,892	0,071	0,869	0,1672	0,288
4	-1	0	0,865	1,626	0,8324	1,083	0,503
5	0	0	0,879	0,4	0,8502	0,4383	0,276
6	-1	0	0,898	1,118	0,8755	0,3236	0,212
7	-1	+1	0,879	1,106	0,8416	0,7756	0,439
8	0	+1	0,88	0,608	0,8565	0,3809	0,264
9	+1	+1	0,903	0,917	0,8747	0,5909	0,206

Примечания: * Приведены средние значения выходных параметров: \bar{y}_1^* – по трем параллельным определениям; \bar{y}_2^* – по уравнениям аппроксимации параллельно испытанных трех образцов при продолжительности эксперимента $t_n=8$ ч и числе точек ряда наблюдений $n=11$; y_1 и y_2 – безразмерные величины.

$$y_1. \sum_{i=1}^N S_{y_1}^2 = 7,116 \cdot 10^4. G = \frac{S_{y_1(\max)}^2}{\sum_{i=1}^N S_{y_1}^2} = 0,372.$$

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{y_1}^2}{N} = 0,7906 \cdot 10^4.$$

$$S_{y_1} = \sqrt{\frac{S_{\text{воспр}}^2}{N \cdot m}} = 0,171 \cdot 10^{-2}.$$

$$y_2. \sum_{i=1}^N S_{y_2}^2 = 3,158 \cdot 10^4. G = 0,375.$$

$$S_{\text{воспр}}^2 = 0,3502 \cdot 10^4.$$

$$S_{y_2} = 0,114 \cdot 10^{-2}.$$

$$y_3. S_{\text{воспр}}^2 = 0,3502 \cdot 10^4 \text{ (принято по данным } y_2 \text{)}.$$

$$S_{y_3} = 0,114 \cdot 10^{-2}.$$

Табличные значения:

$$G_{1-\alpha(2;9)} = 0,478; t_{1-\alpha(18)} = 2,1 \quad t_{1-\alpha(18)} = 2,1 \text{ (при } \alpha = 0,05 \text{)}.$$

G – критерий Кохрена; t – критерий Стьюдента.

⁶ Согласно EN 13163 обозначения типов плит EPS с уровнем прочности на сжатие $\sigma_{10\%}$, равным 80, 120 и 150 кПа соответственно.

⁷ Именованное значение фактора.

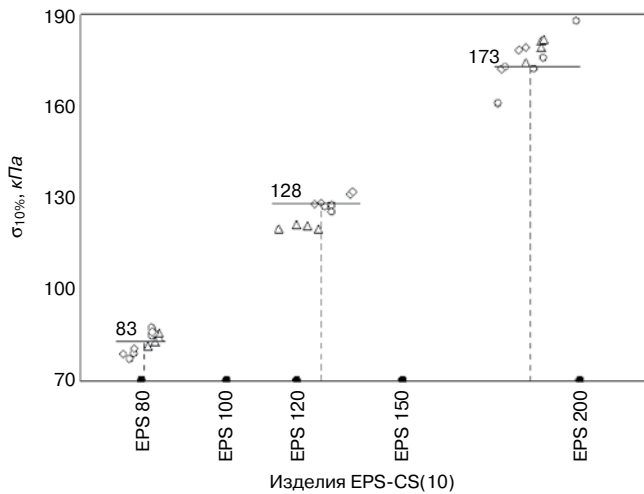


Рис. 2. Фиксируемые уровни прочности образцов $\sigma_{10\%}$ при кратковременном сжатии (фактор x_1). Точки – экспериментальные значения для образцов из плит толщиной, мм: \circ – 50; Δ – 75; \diamond – 100

На основе расширенной матрицы планирования полного факторного эксперимента методом наименьших квадратов [12] рассчитаны квадратические модели зависимости выходных параметров ($y_1, y_2,$ и y_3) от управляемых факторов (x_1, x_2).

В общем виде квадратическая модель записана уравнением:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 \quad (6)$$

Значимость постоянных коэффициентов уравнения (6) проверяли по t – критерию, принятому в [13], при уровне значимости $\alpha=5\%$. Незначимые коэффициенты не включены в уравнение. Адекватность уравнения (6) проверяли по критерию Фишера [14].

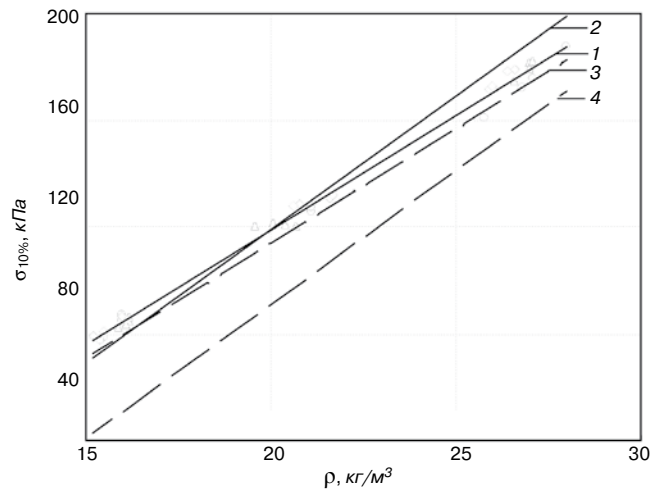


Рис. 3. Эмпирические линии регрессии напряжений $\bar{\sigma}_{10\%}$ при кратковременном сжатии пенополистирольных образцов по результатам определения их плотности ρ : (—) – линии регрессии 1, 2 для среднего значения $\bar{\sigma}_{10\%}$ по данным настоящих и испытаний EN 13163 (уравнение В.1) соответственно; (---) – то же, для минимальной границы резульативного признака (линия 3 для испытанных образцов, линия 4 согласно EN 13163 уравнение В.2). Точки $\circ, \Delta, \diamond, \square$ – экспериментальные значения для образцов толщиной 50, 75, 100 мм соответственно

Результаты исследований. На рис. 3 представлены экспериментальные значения напряжений $\sigma_{10\%}$ (оценка прочности EPS на сжатие). Последние удовлетворяют требованиям EN 13163 (находятся в рекомендуемом нормативном интервале напряжений $\sigma_{10\%}$, вычисляемых по уравнениям В.1 и В.2), и результаты исследований релаксации сжимающего напряжения могут быть использованы для пенополистирольных плит типов EPS 80/90/120 и EPS 150.

По принятой выборке испытанных образцов объемом $n=36$ получены уравнения регрессии:

Таблица 3

№ опыта	x_1	x_2	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\sigma_n^*, \text{кПа}$	$\epsilon_0, \%$	$\sigma(t_n)^{**}, \text{кПа}$	Результаты регрессионного анализа			
							Значения постоянных коэффициентов уравнения (3)			$S_r \cdot 10^2$
							a_0	a_1	a_2	
1	-1	-1	15,7	28,8	1,413	24,6	0,1887	0,212	0,8114	0,6388
2	0	-1	20,6	44,4	1,388	38,9	0,1554	0,2329	0,8446	0,3961
3	+1	-1	25,4	60,9	1,559	54,3	0,131	0,2703	0,869	0,1672
4	-1	0	15,8	29,3	1,227	25,3	0,1677	0,2416	0,8324	1,083
5	0	0	20,5	43	1,01	37,8	0,1498	0,2501	0,8502	0,4383
6	+1	0	26,3	61	1,13	54,8	0,1245	0,2709	0,8755	0,3236
7	-1	+1	15,6	29	1,07	25,5	0,1585	0,1873	0,8416	0,7756
8	0	+1	20,8	44,8	1,014	39,4	0,1436	0,2806	0,8565	0,3809
9	+1	+	25,6	60,2	1,083	54,4	0,1253	0,1915	0,8747	0,5909

* Значения приведены по результатам испытаний контрольных образцов на кратковременное сжатие, принимая $\sigma_n=0,35 \cdot \sigma_{10\%}$.

** Напряжение на образец при окончании эксперимента $t_n=8$ ч.

Таблица 4

Уравнения регрессии	Значения коэффициентов					
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
y_1	0,8788	0,0162	0,0068	-0,004	–	–
y_2	0,8525	0,0223	0,008	-0,0061	–	–
y_3	0,2822	-0,1402	-0,059	0,021	0,0722	0,0317

$$\bar{\sigma}_{10\%} = -53 + 8,59 \cdot \rho$$

$$(S_r = 2,87 \text{ кПа}; R_{\sigma_{10\% \cdot \rho}}^2 = 0,995; \delta = t_{\alpha} \cdot S_r = 4,86 \text{ кПа} (\delta^8)) \quad (7)$$

и

$$\bar{\rho} = 6,25 + 0,116 \cdot \sigma_{10\%}$$

$$(S_r = 0,33 \text{ кг/м}^3; R_{\rho \cdot \sigma_{10\%}}^2 = 0,995; \delta = 0,56 \text{ кг/м}^3 (\delta^8)) \quad (8)$$

На рис. 4 приведены опытные данные и линии регрессии коэффициента релаксации K_p сжимающего напряжения в образцах EPS (аппроксимированы уравнением (3) на базе экспериментов продолжительностью $t_n=8$ ч). Экспериментальные данные испытаний и результаты статистической обработки значений коэффициентов релаксации K_p при постоянной деформации одноосного сжатия $\varepsilon_0=const$, соответствующей напряжению $\sigma_n=0,35 \cdot \sigma_{10\%}$, представлены в табл. 3. В таблице для каждого опыта испытаний релаксации сжимающего напряжения приведены:

- плотность образцов;
- значения деформации ε_0 , возникшей в момент приложения сжимающей удельной нагрузки $\sigma_n=0,35 \cdot \sigma_{10\%}$, и развивающееся во времени при $\varepsilon_0=const$ уменьшение напряжения в момент окончания прямого эксперимента $\sigma(t_n)$;
- постоянные параметры a_0, a_1, a_2 уравнения (3), а также среднее квадратическое отклонение S_r экспериментальных значений, вариант $K_{p(i)}$ от расчетных значений по уравнению (3).

Вычисленные по данным табл. 2 (кодированные переменные) значения коэффициентов уравнения (6) приведены в табл. 4, а результаты статистического анализа полученных уравнений по кодированным переменным в табл. 5. Получены адекватные уравнения (неполные квадратичные для y_1, y_2^9 , полиноме второй степени для y_3), и поэтому становятся значимыми определенные по эксперименту эффекты взаимодействия факторов. Следует заметить, что эксперимент проведен в локальной области факторного пространства и коэффициенты уравнений (табл. 4) отражают влияние факторов только в этой области.

Общий вид значений коэффициентов уравнений по кодированным переменным (табл. 4) показывает, что не все факторы в одинаковой степени влияют на исследуемые выходные параметры. Величина коэффициента уравнения регрессии – количественная мера влияния соответствующего фактора на выходной параметр при переходе с нулевого на верхний и нижний уровни. Чем больше коэффициент, тем сильнее фактор. О характеристике влияния фактора говорят знаки коэффициентов. Знак плюс свидетельствует о том, что с увеличением значения фактора величина выходного параметра растет, а при знаке минус убывает.

Взаимодействие двух факторов в уравнениях (табл. 4) значимо и показывает только, что основной эффект¹⁰ одного фактора зависит от того, на каком уровне находится другой. Отрицательный знак взаимодействия свидетельствует о том, что при одновременном изменении факторов в разных направлениях, например $x_1=+1$ и $x_2=-1$ или $x_1=-1$ и $x_2=+1$, исследуемые выходные параметры y_1, y_2, y_3 будут уменьшаться (без учета линейных эффектов). Положительный знак взаимодействия в уравнении регрессии для y_3 свидетельствует о том, что одновременное увеличение, как и одновременное уменьшение значений двух факторов приводит к увеличению исследуемого выходного параметра. При одно-

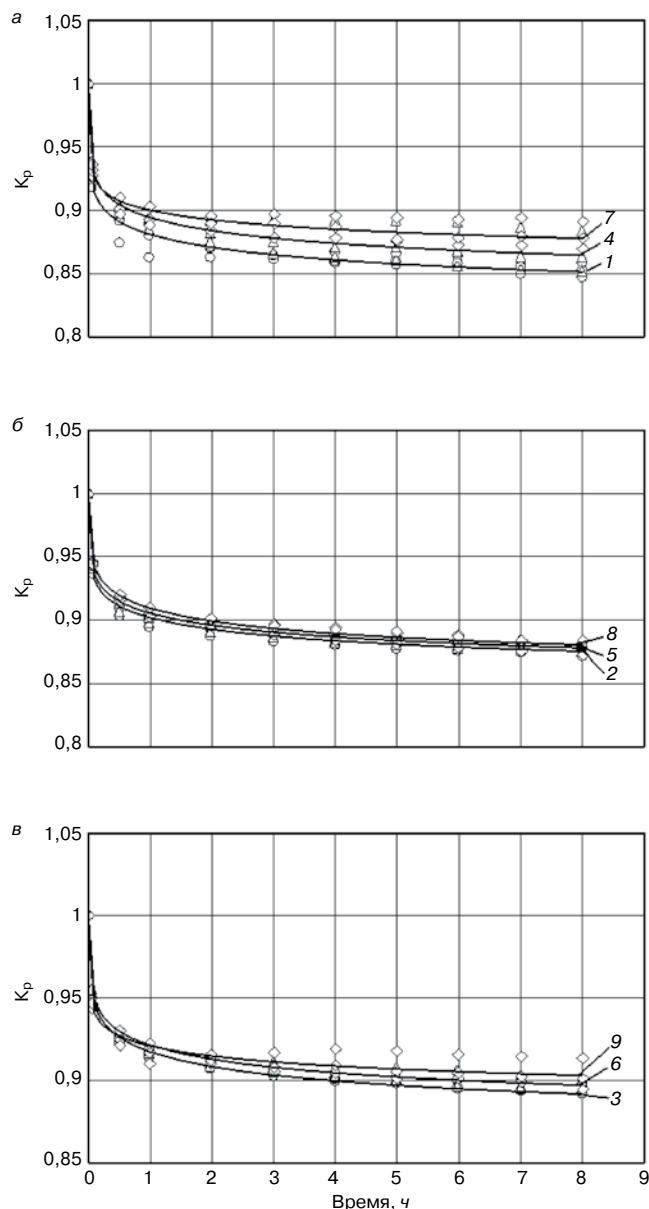


Рис. 4. Кривые коэффициента релаксации напряжения K_p в пенополистирольных образцах по данным экспериментов продолжительностью $t=8$ ч (аппроксимированы уравнением (3)). Толщина образцов, мм: \circ \square – 50; \triangle \square – 75; \diamond \square – 100. Номера кривых – номера опытов по табл. 3

временном изменении факторов в разных направлениях исследуемый параметр y_3 будет уменьшаться.

Значения исследуемых выходных параметров можно найти по данным управляемых факторов x_1, x_2 из уравнений для выходных параметров и y_1, y_2 и y_3 (табл. 4). Исследуя уравнения для параметров y_1 и y_2 , установили, что точка, в которой имеем максимум параметров y_1 и y_2 , по толщине образцов находится в интервале 166–176 мм, т. е. за границей области проведения экспериментов.

Результаты исследования уравнения регрессии для выходного параметра y_3 показали, что экстремальная точка, в которой имеем минимум параметра y_3 по толщине (высоте) образца, находится в точке $x_2=129$ мм (за границей области проведения экспериментов).

После перехода от кодированных (выражение (5)) к натуральным (именованным) переменным и усредне-

⁸ δ – односторонний доверительный интервал для прогностической оценки результативного признака при уровне значимости $\alpha=0,05$.

⁹ Уравнения регрессии для y_1, y_2 приведены в табл. 4 после исключения незначимых коэффициентов b_{11} и b_{22} .

¹⁰ Наличие эффекта взаимодействия факторов не следует отождествлять с наличием зависимости между факторами.

Таблица 5

Расчетные величины	Значение величин для уравнений		
	y_1	y_2	y_3
Число степеней свободы $f_{a,d}$ $f_{воспр}$	5 18	5 18	3 9*
Дисперсии $S_{a,d}^2$ $S_{воспр}^2$	$0,0807 \cdot 10^{-4}$ $0,7906 \cdot 10^{-4}$	$0,0511 \cdot 10^{-4}$ $0,3502 \cdot 10^{-4}$	$0,9348 \cdot 10^{-4}$ $0,3502 \cdot 10^{-4**}$
Критерий Фишера $F_{расч}$ $F_{табл}$	0,1021 2,773	0,146 2,773	2,669 3,863
Вывод об адекватности модели	Адекватна при уровне значимости α , %		
S_r^{***}	0,013	0,01	0,019

* Опыты не дублируются при $t_n > 8$ ч; y_3 представлено, используя значения коэффициента a_2 уравнения (3) приведенными в табл. 3.
 ** Принято по данным y_2 (табл. 2) и характеризует величину погрешности эксперимента продолжительностью $t_n = 8$ ч.
 *** Абсолютная величина средней меры уклонений опытных данных от эмпирической поверхности отклика, постоянная для всех ее участков:

$$S_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^{m_i} (y_{iu} - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N m_i - l}}$$

где y_{iu} , \hat{y}_i – фактическое и расчетное по уравнениям y_1 , y_2 , y_3 (по кодированным переменным) i -е значение результативного признака; m – число параллельных испытаний в отдельных точках плана эксперимента ($m=3$); N – число опытов эксперимента ($N=9$); l – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии.

Таблица 6

Уравнения регрессии	Значения коэффициентов						S_r	$N \cdot m$
	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}		
y_1	0,7792	$0,626 \cdot 10^{-3}$	$0,729 \cdot 10^{-3}$	$-0,356 \cdot 10^{-5}$	–	–	0,0183	27
y_2	0,7131	$0,901 \cdot 10^{-3}$	$0,1013 \cdot 10^{-2}$	$-0,542 \cdot 10^{-5}$	–	–	0,0207	27
y_3	1,9066	-13,643*	-0,01236	0,01867*	35,654*	$0,507 \cdot 10^{-4}$	0,0113	9
Управляемые факторы	Содежит эффект взаимодействия факторов и вклад квадратичных членов	$\sigma_{10\%}$, кПа* МПа	d , мм	$\sigma_{10\%}^* \cdot d$; $\sigma_{10\%}^*$, МПа	$\sigma_{10\%}^2$, МПа ²	d^2		

ния коэффициентов регрессии уравнения для выходных параметров приведены в табл. 6. При этом пропадает возможность интерпретации влияния факторов по величинам и знакам коэффициентов регрессии.

Графическое отображение результатов двухфакторного эксперимента представляет собой так называемую поверхность отклика в трехмерном пространстве (рис. 5). Проекция основных образующих отклика входных параметров K_p в фиксируемый момент времени $t=8$ ч, $K_{затух}$ и $I_r(t \rightarrow \infty)$ на координатные плоскости изображены на рис. 6–8.

При фиксированном значении фактора x_1 (прочность образцов при сжатии $\sigma_{10\%}$) на трех уровнях на рис. 6, а и 7, а представлены зависимости выхода K_p для $t=8$ ч и $K_{затух}$ от другого фактора x_2 (толщина образцов). Исследуя образующие отклика выходных параметров K_p для $t=8$ ч и $K_{затух}$ при зафиксированном значении фактора x_2 (толщина образцов) на рис. 6, б и 7, б приведены полученные зависимости выхода этих параметров от фактора x_1 (прочность образцов при сжатии $\sigma_{10\%}$).

При зафиксированном значении фактора x_1 (прочность образцов при сжатии $\sigma_{10\%}$) на трех уровнях на рис. 8, а представлена зависимость выхода $I_r(t \rightarrow \infty)$ от другого фактора x_2 (толщины образца), подтверждающая наличие «почти стационарной области» по данному

фактору за пределами области проведения экспериментов. На основании исследования образующих отклика выходного параметра $I_r(t \rightarrow \infty)$ при зафиксированном значении фактора x_2 (толщины образца) на трех уровнях, на рис. 8, б показана зависимость этого параметра от фактора x_1 (прочность образцов при сжатии $\sigma_{10\%}$).

В исследуемой области факторного пространства значение коэффициента релаксации K_p для $t=8$ ч, определенное на образцах толщиной 50 мм, в среднем на 2,6% меньше по сравнению со значением K_p для $t=8$ ч, определенным на образцах толщиной 100 мм при прочности пенополистирола при сжатии $\sigma_{10\%}=83$ кПа. При $\sigma_{10\%}=173$ кПа эта разница составляет меньше 1% (практически 0,7%). Разница значений K_p для $t=8$ ч, определенных на образцах толщиной 100 и 50 мм, составляет 0,022–0,006 соответственно прочности $\sigma_{10\%}=83 \div 173$ кПа и служит подтверждением незначительного влияния толщины образцов на экспериментальное определение коэффициента релаксации напряжения в фиксируемый момент времени $t=8$ ч.

Значение коэффициента релаксационной стойкости $K_{затух}$ ($=a_2$ – коэффициенту уравнения (3)), определенное на образцах толщиной 50 мм, меньше в среднем на 3,4% по сравнению с определенным на образцах толщиной 100 мм при прочности пенополистирола при сжатии

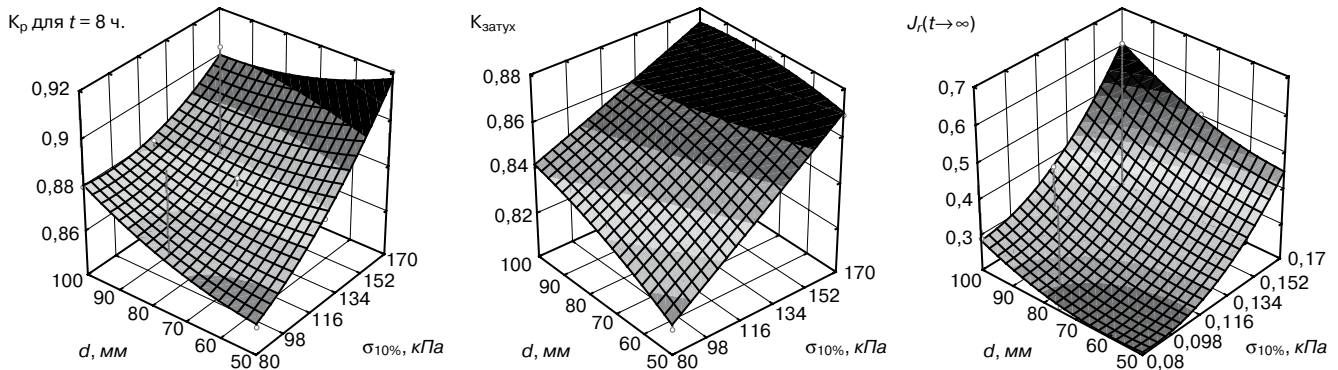


Рис. 5. Геометрический образ поверхности отклика в трехмерном пространстве выходных параметров: K_p для момента времени $t=8$ ч; $K_{затух}$; $I_r(t \rightarrow \infty)$

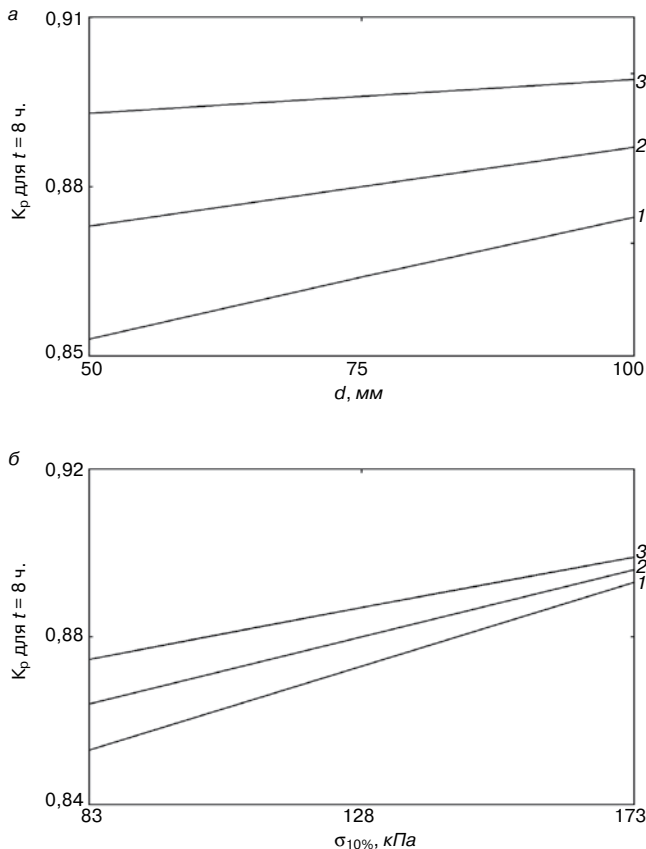


Рис. 6. Графики уравнения коэффициента релаксации сжимающего напряжения K_p в фиксируемый момент времени $t=8$ ч (y_1 , табл. 6): а – при $\sigma_{10\%}=83$ (1); 128 (2); 173 кПа (3); б – $d=50$ (1), 75 (2), 100 мм (3)

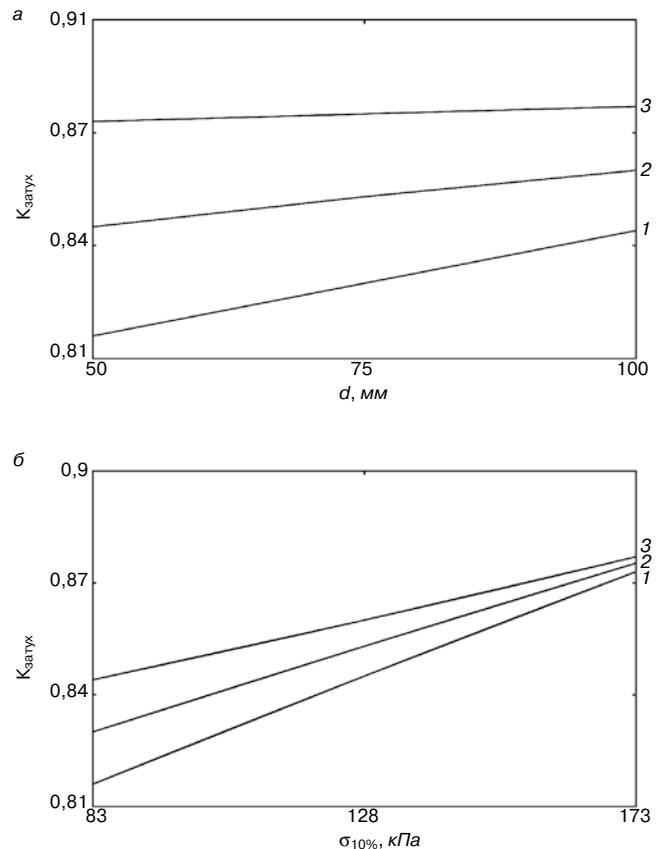


Рис. 7. Графики уравнения коэффициента затухания уменьшения сжимающего напряжения $K_{затух}$ (y_2 , табл. 6). Обозначения см. на рис. 6

$\sigma_{10\%}=83$ кПа, а при прочности $\sigma_{10\%}=173$ кПа эта разница составляет меньше 1% (практически 0,5%).

Значения податливости $I_r(t \rightarrow \infty)$ при релаксации в интервале прочности пенополистирола $\sigma_{10\%}=83 \div 173$ кПа, определенные на образцах толщиной 50 мм, в среднем на 31% больше по сравнению с образцами толщиной 75 и 100 мм. Следует отметить, что в исследуемом интервале прочности разница значений $I_r(t \rightarrow \infty)$ для образцов толщиной 50 мм и 75, 100 мм составляет 0,16–0,076 МПа⁻¹ соответственно величине $\sigma_{10\%}$. При толщине образцов 75 и 100 мм разница значений составляет 0,05–0,006 МПа⁻¹ соответственно увеличению $\sigma_{10\%}$, т. е. в этом случае с увеличением прочности $\sigma_{10\%}$ пенополистирола влияние толщины образцов на значения $I_r(t \rightarrow \infty)$ является незначительным.

Для вычисления установившегося равновесного напряжения $\sigma(t \rightarrow \infty)$ при релаксации в интервале постоян-

ной деформации $\varepsilon_0=1-1,4\%$ предлагаются эмпирические формулы (9) и (10) с использованием уравнений y_2 и y_3 и табл. 6.

$$\sigma(t \rightarrow \infty) = \sigma_H \cdot K_{затух}, \quad (9)$$

где σ_H – начальное напряжение, равное $0,35 \cdot \sigma_{10\%}$; $K_{затух}$ вычисляются по уравнению y_2 табл. 6:

$$\sigma(t \rightarrow \infty) = \frac{\varepsilon_0}{I_r(t \rightarrow \infty)}, \quad (10)$$

где ε_0 – постоянная относительная деформация в процессе релаксации напряжения; $I_r(t \rightarrow \infty)$ – податливость при релаксации напряжения, МПа⁻¹, вычисляются по уравнению на основании данных из табл. 6.

Сопоставление на количественной основе полученных значений $I_r(t \rightarrow \infty)$ с данными опытов на ползу-

Таблица 7

Прочность при сжатии $\sigma_{10\%}$, кПа	σ_c , кПа	$\varepsilon_c(t_n=122 \text{ сут})$, %	$I_c^{\text{эксп}}(t_n=122 \text{ сут})$, МПа ⁻¹	$I_r(t \rightarrow \infty)$, МПа ⁻¹	$I_c^{\text{расч}}(t_n=122 \text{ сут})$, МПа ⁻¹	Δ , %	Использование экспериментальных значений $\varepsilon_c(t_n=122 \text{ сут})$. Источник*
110	39	0,85	0,2179	0,4488	0,2457	-11,3	[20]
120	41,7	0,64	0,1535	0,4036	0,208	-26,2	
84,6	29,6	0,93	0,3142	0,5954	0,3682	-14,7	
84,9	29,7	0,87	0,2929	0,5934	0,3665	-20,1	
123	43,2	0,63	0,1574	0,3915	0,1979	-20,5	
84,5	29,9	1,158	0,3873	0,5961	0,3687	+5	[21]
175	61,6	0,541	0,0878	0,2832	0,1075	-18,3	
121	42,6	0,808	0,1897	0,3996	0,2047	-7,3	
164	57,3	0,491	0,0857	0,2899	0,1131	-24,2	
190	66,5	0,839	0,1262	0,2879	0,1114	+13,3	
138	48,6	0,763	0,157	0,3405	0,1553	+1,1	

Примечания:

σ_c , $\varepsilon_c(t_n=122 \text{ сут})$ – приведены для удобства читателя из [15, 16].

$$I_c^{\text{эксп}}(t_n=122 \text{ сут}) = \frac{\varepsilon_c(t_n=122 \text{ сут})}{\sigma_c}$$

$I_r(t \rightarrow \infty)$ – вычислено по уравнению y_3 табл. 6.

$I_c^{\text{расч}}(t_n=122 \text{ сут})$ – вычислено по формуле (12).

$$\Delta = \frac{I_c^{\text{эксп}} - I_c^{\text{расч}}}{I_c^{\text{расч}}} \cdot 100, \%$$

* Плиты EPS изготовлены разными производителями беспрессовым способом из сырья с гранулами диаметром 0,8–2,5 мм, производимого европейскими фирмами Styrochem и BASF. Исследования выполнены на образцах в форме куба с ребром 50 мм.

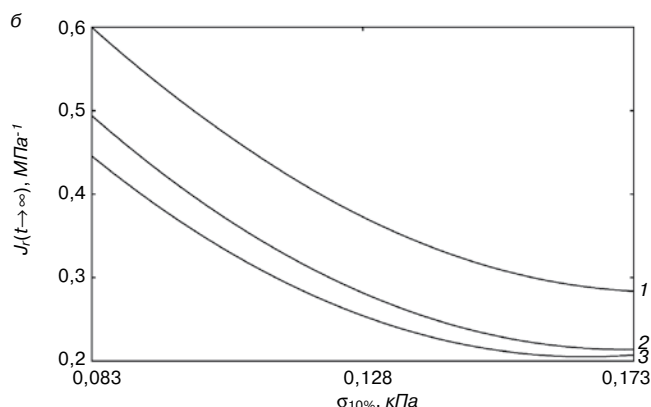
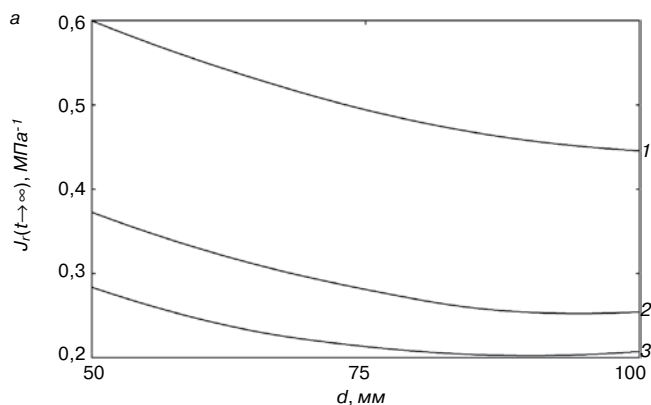


Рис. 8. Графики уравнения податливости при релаксации I_r для $t \rightarrow \infty$ (y_2 , табл. 6). Обозначения на рис. 6.

чество выполнено с использованием результатов исследований [1]¹¹.

На основе статистической обработки табличных значений [1, табл. 3] и экспериментальных результатов выборки настоящих исследований (уравнение y_3 табл. 6) установлено наличие линейной взаимозависимости между $I_r(t \rightarrow \infty)$ – и $I_c(t_n=122 \text{ сут})$ ¹². В исследуемой области факторного пространства уравнения регрессии имеют вид:

$$I_r(t \rightarrow \infty) = 0,185 + I_c(t_n = 122 \text{ сут}) \quad (11)$$

со среднеквадратическим отклонением $S_r=0,05$ при объеме выборки $n=15$.

$$I_c(t_n = 122 \text{ сут}) = -0,129 + 0,835 \cdot I_r(t \rightarrow \infty) \quad (12)$$

со значением $S_r=0,046$ ($n=15$).

На рис. 9 представлены экспериментальные данные и эмпирические линии регрессии – податливости при релаксации $I_r(t \rightarrow \infty)$ по результатам определения податливости при ползучести $I_c(t_n=122 \text{ сут})$ (линия 1) и обратной регрессии $I_c(t_n=122 \text{ сут})$ по результатам $I_r(t \rightarrow \infty)$ (линия 2). Из рис. 9 видно, что линии 1 и 2 достаточно хорошо согласуются между собой, а высокий коэффициент корреляции $R=0,916$ подтверждает линейную взаимозависимость между переменными I_r и I_c .

Таким образом, в первом приближении перевод данных о ползучести в данные о релаксации напряжения или наоборот может быть осуществлен с использованием простых уравнений регрессии (11) и (12).

В табл. 7 представлено сравнение экспериментальных значений податливости при ползучести $I_c(t_n=122 \text{ сут})$ исследований [15, 16] с вычисленными по уравнению (12) и у по данным из табл. 6.

¹¹ В [1] представлены экспериментальные результаты испытаний пенополистирольных образцов на ползучесть при постоянном сжимающем напряжении $\sigma_c=0,35 \cdot \sigma_{10\%}$. Испытания выполнены для плит EPS 80/120 и EPS 150 плотностью 15–24 кг/м³, изготовленных одним и тем же производителем беспрессовым способом из того же сырья, что и плиты настоящих исследований.

¹² $t_n=122 \text{ сут}$ – продолжительность эксперимента рекомендована в EN 13163 при испытании полистирольных изделий на ползучесть.

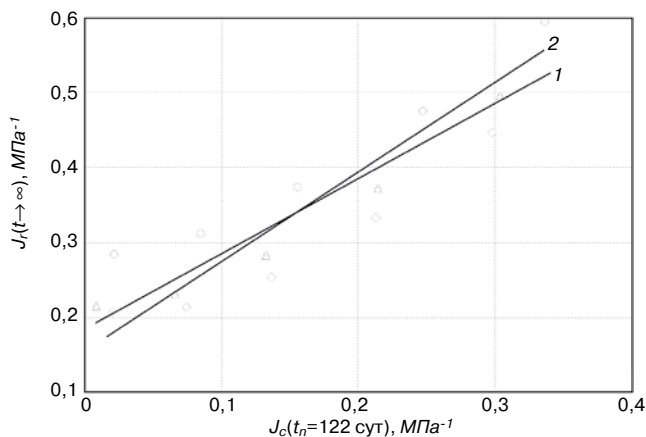


Рис. 9. Эмпирические линии регрессии для образцов толщиной 50, 75, 100 мм соответственно $I_r(t \rightarrow \infty)$ по $I_c(t_n=122 \text{ сут})$ (линия 1) и обратной регрессии $I_c(t_n=122 \text{ сут})$ по результатам $I_r(t \rightarrow \infty)$ (линия 2)

Расхождение значений $I_c(t_n=122 \text{ сут})$ составляет: в восьми случаях $-7,3 - -26,2\%$ или в среднем $-17,8\%$ при вариации $\approx 36\%$ и в трех случаях $+1,1 - +13,3\%$ – в среднем $+6,5\%$.

Учитывая, что результаты, полученные на основании выборки распространяются на неизученные значения I_r и I_c , т. е. имеет место так называемый prediction (прогноз), в практике таких расчетов принимают вероятность равной 80–90% [13, 17]. Поэтому гипотетическую оценку податливости при ползучести $I_c(t_n=122 \text{ сут})$ при постоянном сжимающем напряжении $\sigma_c=0,35 \cdot \sigma_{10\%}$ с применением уравнений (12) и y_3 (табл. 6) можно считать достаточно достоверной.

При отсутствии длительных испытаний на ползучесть эмпирические уравнения (12) и y_3 (табл. 6) могут быть использованы для гипотетической оценки деформации ползучести $\varepsilon_c(t_n=122 \text{ сут})$ ¹³ пенополистирольных плит типов EPS 80/90/100/120 и EPS 150 при постоянном сжимающем напряжении $\sigma_c=0,35 \cdot \sigma_{10\%}$.

Заключение. Методом математико-статистического планирования эксперимента получены математические модели оптимизации толщины образцов при определении релаксации напряжения в условиях одноосного сжатия при постоянной деформации, фиксируемой при нагружении сжимающим напряжением, равным $\sigma_c=0,35 \cdot \sigma_{10\%}$.

Приводится графическая интерпретация полученных моделей: линия уровня зависимости коэффициента релаксации K_p в фиксируемый момент времени $t=8 \text{ ч}$, коэффициента релаксационной стойкости $K_{затух}$ и податливости при релаксации $I_r(t \rightarrow \infty)$ по отношению к толщине образцов при прочности пенополистирола при сжатии $\sigma_{10\%}$ в интервале 83–173 кПа.

Влияние толщины образцов на значения коэффициентов K_p для момента времени $t=8 \text{ ч}$ и $K_{затух}$, характеризующего релаксационную стойкость пенополистирола, в исследуемом факторном пространстве является незначительным.

Значения податливости при релаксации $I_r(t \rightarrow \infty)$ в интервале 83–173 кПа, определенные на образцах толщиной 50 мм, больше в среднем на 31% по сравнению с образцами толщиной 75 и 100 мм. Влияние толщины образцов 75 и 100 мм на величину податливости при релаксации $I_r(t \rightarrow \infty)$ с увеличением прочности $\sigma_{10\%}$ пенополистирола при сжатии становится незначительным.

Выполнено на количественной основе сопоставление экспериментальных значений податливостей $I_r(t \rightarrow \infty)$ и $I_c(t_n=122 \text{ сут})$ для пенополистирольных плит

EPS 80 – EPS 150, приведены уравнения линейной взаимозависимости между переменными I_r и I_c .

При отсутствии длительных испытаний на ползучесть гипотетическая оценка деформаций ползучести $\varepsilon_c(t_n=122 \text{ сут})$ пенополистирольных плит типов EPS 80/90/100/120 и EPS 150 при постоянном сжимающем напряжении $\sigma_c=0,35 \cdot \sigma_{10\%}$ может быть определена по эмпирическим уравнениям (12) и y_3 , приведенным в табл. 6.

Для вычисления установившегося равновесного напряжения при релаксации в интервале постоянной деформации сжатия $\varepsilon_0=1-1,4\%$ предлагаются эмпирические формулы с использованием уравнений регрессии для y_2 и y_3 , приведенных в табл. 6.

Список литературы

1. Гнип И.Я., Вайткус С. Исследование ползучести полистирольного пенопласта (EPS) при постоянном сжимающем напряжении с использованием статистического планирования эксперимента // *Строительные материалы*. 2013. № 10. С. 49–56.
2. Vaitkus S., Granov V., Gnip I., et al. Stress relaxation in expanded polystyrene (EPS) under uniaxial loading conditions // *11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*. MBMT 2013: Procedia Engineering. 57 (2013). pp. 1213–1222.
3. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. М.: Высшая школа, 1976. 277 с.
4. Уорд И. Механические свойства твердых полимеров / Пер. с англ. М.: Химия, 1975. 358 с.
5. Ведерников М.М., Коршунов А.И., Поляков Л.В. Прогнозирование процессов ползучести и релаксации пенопласта ПС-1 разной плотности // *XVI международная конференция «Физика прочности и пластических материалов»*. Самара, июнь 2006 г.
6. Малкин А.Я. Аскадский А.А. Коврига В.В. Методы измерения механических свойств полимеров. М.: Химия, 1978. 332 с.
7. Imad A., Ouâkka, Dang Van K. and Mesmacgue. Analysis of the Viscoelastoplastic behavior of expanded polystyrene under copressive loading: experiments and modeling // *Strength of materials*. 2001. Vol. 33. No. 2. pp. 140–149.
8. Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей (Применение методов корреляционного и регрессионного анализа и обработка результатов эксперимента). М.: Металлургия, 1968. 228 с.
9. Аскадский А.А. Деформация полимеров. М.: Химия, 1973. 448 с.
10. Аскадский А.А. Структура и свойства теплостойких полимеров. М.: Химия, 1981. 320 с.
11. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
12. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Т. 1 / Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
13. Закс Л. Статистическое оценивание / Пер. с нем. М.: Статистика, 1976. 598 с.
14. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. М.: Высшая школа, 1978. 320 с.
15. Gnip I.J., Vaitkus S., Keršulis V., Vejelis S. Long-term prediction of compressive creep development in expanded polystyrene. *Polymer Testing*. 2008. No. 27, pp. 378–391.
16. Gnip I.J., Vaitkus S., Keršulis V., Vejelis S. Analytical description of the creep of expanded polystyrene (EPS) under long-term compressive loading. 2011. *Polymer Testing*. No. 30, pp. 493–500.

¹³ См. сноску 5.

17. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977. 200 с.

References

- Gnip I.J., Vaitkus S. Research of Creep polystyrene foam (EPS) for a constant compressive stress using a statistical design of experiments. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 10, pp. 49–56. (In Russian).
- Vaitkus S., Granov V., Gnip I., et al. Stress relaxation in expanded polystyrene (EPS) under uniaxial loading conditions. *11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*. MBMT 2013: Procedia Engineering. 57 (2013), pp. 1213–1222.
- Koltunov M. Polzuchest' i relaksatsiya [Creep and relaxation]. Moscow: Vysshaya shkola. 1976. 277 p.
- Ward I. Mekhanicheskie svoystva tverdykh polimerov [Mechanical properties of solid polymers]. Translation from English. Moscow: Khimiya. 1975. 358 p.
- Vedernikov I., Korshunov A., Polyakov L. Prediction creep and relaxation processes in foam plastic PS-1 with different density. *16th International conference "Physics of durability and plasticity of materials"*. Samara, June 2006. (In Russian).
- Malkin A., Askadsky, A., Kovriga V. Metody izmereniya mekhanicheskikh svoystv polimerov [Methods of measuring mechanical properties of polymeric materials]. Moscow: Khimiya. 1978. 332 p.
- Imad A., Ouakka, Dang Van K. and Mesmacgue. Analysis of the Viscoelastoplastic behavior of expanded polystyrene under compressive loading: experiments and modeling. *Strength of materials*. 2001. Vol. 33. No. 2, pp. 140–149.
- Aivazyan S. Statisticheskoe issledovanie zavisimosti (Primenenie metodov korrelyatsionnogo i regressionnogo analizov i obrabotka rezul'tatov eksperimenta) [Statistical investigation of dependences (Application of the methods of correlation and regression analyses to processing experimental results)]. Moscow: Metallurgiya. 1968. 228 p.
- Askadskiy A. Deformatsiya polimerov [Deformations of polymers]. Moscow: Khimiya. 1973. 448 p.
- Askadskiy A. Struktura i svoystva teplostoikikh polimerov [The structure and properties of heat-resistant polymers]. Moscow: Khimiya. 1981. 320 p.
- Adler J., Markova E., Granovsky J. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii [Experiment design for determining optimal conditions]. Moscow: Nauka. 1976. 279 p.
- Draper N., Smith G. Prikladnoi regressionnyi analiz [The applied regression analysis]. Vol. 1 Translation from English. Moscow: Finances and statistics. 1986. 366 p.
- Zaks L. Statisticheskoe otsenivanie [Statistical evaluation]. Translation from Germany. Moscow: Statistics. 1976. 598 p.
- Achnazarova S., Kapharov V. Optimizatsiya eksperimenta v khimii i khimicheskoi tekhnologii [Optimizing the experiment in chemistry and chemical technology]. Moscow: Vysshaya shkola. 1978. 320 p.
- Gnip I.J., Vaitkus S., Keršulis V., Vejelis S. Long-term prediction of compressive creep development in expanded polystyrene. *Polymer Testing*. 2008. No. 27, pp. 378–391.
- Gnip I.J., Vaitkus S., Keršulis V., Vejelis S. Analytical description of the creep of expanded polystyrene (EPS) under long-term compressive loading. *Polymer Testing*. 2011. No. 30, pp. 493–500.
- Chetyrkin Y. Statisticheskie metody prognozirovaniya [Statistical methods of prediction]. Moscow: Statistika. 1977. 200 p.

VIII Международная конференция

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
NTC-2016

25–30 марта 2016 г.

Шарм-эль-Шейх, Египет

Организаторы конференции

Национальный исследовательский центр жилья и строительства (HBRC)

Египетско-российский университет (ERU)

Ижевский государственный технический университет

им. М.Т. Калашникова

Египетский союз инженеров



Тематика конференции

- Нанокompозиты в строительных материалах
- Нанотехнологии в строительстве
- Защита от пожара с помощью наночастиц
- Нанотехнологии в кондиционировании воздуха
- Наноструктурирующие материалы в архитектуре
- Производство лакокрасочных материалов с нанодобавками
- Нанотехнологии стекол и керамики
- Нанотехнологии для энергоэффективности в зданиях
- Моделирование нанокompозитов
- Модификация минеральных вяжущих наносистемами

Информационная поддержка – журнал «Строительные материалы»®



Сайт конференции: http://inter.istu.ru/russian/nano_r.html

Контактная информация в России

Профессор Григорий Иванович Яковлев
ИжГТУ им. М.Т. Калашникова
426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7
E-mail: gyakov@istu.ru

Тел.: 8-91285666688. Факс: +7(3412)59 25 55

Контактная информация в Египте

Профессор Шериф Солиман Хелми
Египетско-российский университет
Cairo High Road, Bard City-Suez
E-mail: president@eruegypt.com

Тел.: +20(02)28643349, (02)28643341. Факс: +20(02)28643332

УДК 691.261

М.С. ЛЕБЕДЕВ, канд. техн. наук (lebedevms@mail.ru), И.В. ЖЕРНОВСКИЙ, канд. геол.-мин. наук, Е.В. ФОМИНА, канд. техн. наук, А.Е. ФОМИН, магистрант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

Особенности использования глинистых пород при производстве строительных материалов*

На основании анализа литературных данных и экспериментальных исследований, с учетом особенностей состава и свойств алюмосиликатного сырья осадочной толщи показаны возможности его использования в составе строительных материалов в качестве: компонента сырьевой шихты для получения цемента, керамики, пористых заполнителей; составляющей композиционных вяжущих гидравлического, воздушного и автоклавного твердения; добавок, заполнителей и наполнителей в цементные, керамические, органо-минеральные системы. Однако исходя из генетических особенностей такого нетрадиционного сырья имеются ограничения по применению, поэтому в большинстве случаев для повышения его эффективности необходима модификация. В данной работе рассматривается расширение областей использования алюмосиликатных пород осадочной толщи, модифицированных термической обработкой при умеренной температуре 300–900°C. Термическая модификация позволяет улучшить качественные и технико-экономические характеристики полифункциональных композитов для строительной отрасли.

Ключевые слова: глинистые породы, алюмосиликатное сырье, композиционное вяжущее, строительные материалы, термоактивация.

M.S. LEBEDEV, Candidate of Sciences (Engineering) (lebedevms@mail.ru), I.V. ZHERNOVSKIY, Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), E.V. FOMINA, Candidate of Sciences (Engineering), A.E. FOMIN, Master Student
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov(46, Kostyukov Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

Features of Clay Rocks Application when Construction Material Production*

On the basis of the analysis of literature data and experimental results with due regard for characteristics of composition and properties of aluminum silicate raw materials from sedimentation mass, the opportunities of its usage in construction materials as a raw component for production of cement, ceramic, porous aggregates; as a component in composite binders of hydration, air and autoclaved hardening; additives, aggregates and fillers in cement, ceramic, organo-mineral systems are demonstrated. However, on the basis of genetic features of these non-traditional raw materials there are restrictions on its application. Therefore, in most cases, a modification is required to increase its efficiency. In this paper the expansion of fields of application of aluminum silicate rocks from sedimentation mass modified by heat treatment at 300–900°C is considered. Thermal modification makes it possible to improve qualitative and techno-economic characteristics of polyfunctional composites for the construction industry.

Keywords: clay rocks, aluminum silicate raw materials, composite binder, construction materials, thermal activation.

На современном этапе развития промышленности РФ взамен установившихся консервативных подходов находят применение новые и перспективные идеи, направленные на снижение энерго- и ресурсопотребления. Не является исключением и строительная отрасль, где в основном для получения строительных материалов различного назначения используется ограниченный спектр минерального сырья, выбор которого производится по сформулированным в стандартах правилам. Однако постепенно внедряются новые технологии, направленные на модернизацию отдельных видов производств и основанные на применении местных сырьевых ресурсов, способных без потери качества заменить традиционные материалы. Последнее направление представляется весьма актуальным и перспективным.

Учитывая, что из толщ осадочных пород добывается более 95% всех полезных ископаемых [1], существуют предпосылки применения крупнотоннажных отложений вскрышных пород в качестве сырья для производства основной массы строительных материалов.

В большинстве своем осадочные породы представляют собой полиминеральные системы, для которых характерны значительные колебания в химическом и видовом составе, обусловленные условиями и локализацией мест образования. В частности, к таким образованиям относятся алюмосиликатные породы палеозойских, нижнемезозойских, верхнемеловых и кайнозой-

ских отложений Южного Урала, вмещающих угленосные пласты, особенности состава которых были изучены ранее [2, 3]. В минеральном составе, согласно данным РФА, присутствуют кристаллические фазы кварца, каолинита, монтмориллонита, иллита, биотита и полевых шпатов. Часть вещества пород является рентгеноаморфным, в него входят примеси углистого вещества, а также диатомиты, сформированные кристобалит-тридимитовыми опалами, диагностируемые по данным сканирующей электронной микроскопии.

В своем большинстве эти породы не удовлетворяют требованиям нормативных документов в качестве сырья для производства вяжущих и керамических материалов и их не рассматривают как полезные ископаемые, запасы их не утверждены Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых. Принимая во внимание тот факт, что эти породы являются достаточно типичными представителями осадочного чехла не только России, но и планеты в целом, в настоящей статье рассмотрены возможные области применения их при производстве строительных материалов.

Содержание в осадочных отложениях глинистых минералов, а также различных примесей является основной причиной, препятствующей применению пород в качестве сырья для получения различных строительных материалов и их компонентов. Однако, как показывает практика, путем модифицирования такого минерально-

* Работа выполнена в рамках служебного задания по госбюджетной теме № А-4/14 Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012–2016 годы (№ 2011-ПР-146. Мероприятие 2 «Модернизация научно-исследовательского процесса и инновационной деятельности»); стипендия Президента Российской Федерации № СП-2099.2015.1.

* The work was completed under the duty assignments for the state budget topic № А-4/14 of The Program of Strategic Development of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (№ 2011-PR-146. The Event 2 «Modernization of scientific-research process and innovative activities»); Scholarship of the President of the Russian Federation № SP-2099.2015.1.

го сырья можно добиться повышения эффективности его применения в строительной индустрии. Использование осадочных пород является перспективным еще и потому, что слоистые алюмосиликаты в силу своих размеров и строения являются высоко-реакционным материалом [2]. Реализация потенциала этих минералов в строительных композициях может способствовать повышению физико-механических и эксплуатационных характеристик последних.

На основании ранее полученных сведений о составе [2, 3] и имеющихся литературных данных о применимости различных методов модифицирования и возможных областях использования подобных материалов [4] было сформулировано предположение о целесообразности термической модификации алюмосиликатного сырья для его перевода в материал со стабильными свойствами при воздействии воды. Этот способ является одним из наиболее доступных, а также позволяет снизить влияние нежелательных примесей, например углистого вещества, и повысить реакционную способность слагающих породу минералов за счет удаления адсорбированной воды и образования новых поверхностей с активными центрами.

В связи с этим возникает необходимость выбора наиболее приемлемых условий термической обработки для решения этой задачи.

Согласно ранее проведенному анализу выбора температуры обработки минеральных компонентов в технологии строительных материалов низкотемпературная обработка (сушка) до 300°C должна обеспечивать полное удаление содержащейся свободной влаги без изменения структуры вещества [5]. При обжиге (свыше 900°C) происходят необратимые изменения фазового состава и структуры исходного материала. Умеренной температурной обработки (~300–900°C), как правило, недостаточно для получения строительных материалов и их компонентов. Однако, согласно литературным данным [4, 6], обработка минеральных материалов в данном температурном интервале позволяет повысить их активность за счет формирования наиболее реакционноспособного состояния вещества. Кроме того, эти материалы характеризуются возрастанием удельной поверхности и изменением распределения частиц по размерам в области малых значений при механической обработке [7]. Реализация возникающего энергетического потенциала при получении строительных материалов может способствовать не только повышению качественных характеристик композитов при использовании дешевого местного попутноизвлекаемого сырья, но и снижению энергоемкости при помоле.

Предложенная технология модифицирования (термическая обработка сырья) на основании анализа лите-

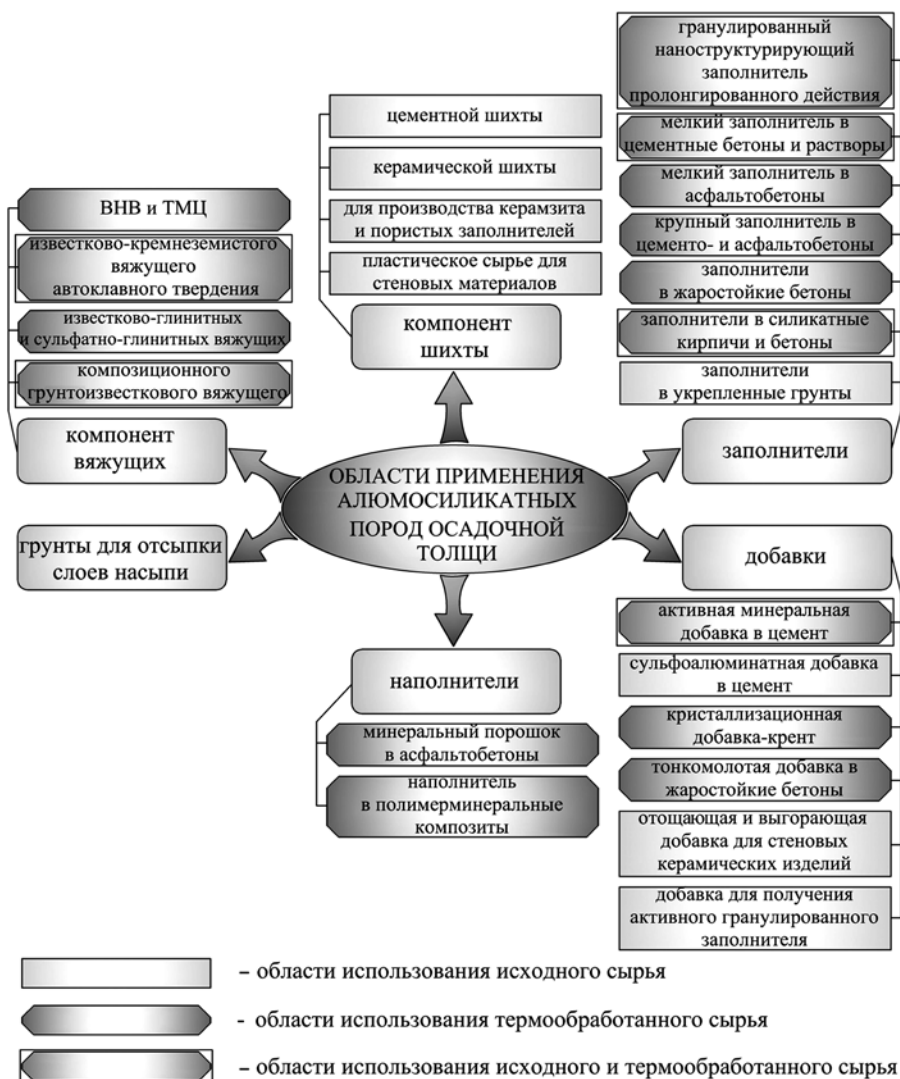


Схема рациональных областей использования исходных и термообработанных алюмосиликатных пород осадочной толщи при получении строительных материалов

ратурных данных и экспериментальных исследований позволила определить альтернативные области использования получаемого термообработанного сырья. С учетом ранее проведенных в БГТУ им. В.Г. Шухова исследований в области производства строительных материалов, дорожного строительства и разработанных схем рациональных областей использования [8, 9] была составлена обобщенная схема отраслей применения глинистого алюмосиликатного сырья в естественном состоянии и после термообработки при получении строительных материалов (рисунок).

Подобные необработанные сырьевые материалы используются в основном в производстве стеновых керамических материалов, керамзита, пористых заполнителей, а также в качестве компонента цементной шихты, так как по химическому и минеральному составам они соответствуют традиционному глинистому сырью. Однако в качестве примеси в них присутствует органический материал в виде углистого вещества и соединений серы.

Содержание алюминатной части и угля являются определяющими параметрами сырья для получения керамических стеновых изделий. Например, при содержании Al_2O_3 более 15% в минеральной части и угля менее 15% алюмосиликатные породы могут являться бездобавочным сырьем с требуемой пластичностью [6]. При бо-

лее высоком содержании органики снижается пластичность и связующая способность массы и в сырьевую смесь необходимо дополнительно вводить глину.

Углеродсодержащие материалы применяют также как отошающую и выгорающую топливосодержащую добавку в глиняную шихту. Это дает возможность улучшить прочностные показатели изделий (до 30–40%) при одновременной экономии топлива (угля) и повышении производительности печей.

Для повышения морозостойкости и улучшения теплоизоляционных свойств керамических изделий на основе аргиллита, алевролита и др. углеродсодержащие породы могут выступать в качестве поризующих и отошающих добавок при совместном их применении с подобными сырьевыми материалами.

Кроме применения в качестве добавок углеродсодержащие породы могут выступать и как основной компонент керамической шихты. С использованием такого сырья возможно получать пустотелый кирпич и керамические камни пластическим и полусухим формованием. Присутствие в алюмосиликатном сырье углеродного компонента делает его эффективным для производства пористых заполнителей и керамзита. Однако следует учитывать, что значительные колебания в алюмосиликатном сырье углеродного компонента, его дисперсное распределение, низкая пластичность и связующая способность требуют корректировки состава и технологии производства пористых керамических изделий [10].

Другим весьма значительным направлением использования алюмосиликатных пород осадочной толщи является цементная промышленность. По данным химического состава подобные породы, в том числе с примесью угля, могут быть компонентом сырьевой шихты при производстве портландцемента и исходя из содержания основных оксидов могут частично или полностью заменить силикатную, алюмосиликатную и железистую составляющие, что подтверждено промышленными испытаниями. Кроме того, в процессе производства улучшается подготовка материала за счет гомогенизации шихты, повышается прочность гранул и спекаемость клинкера, увеличивается производительность вращающейся печи [11].

Перспективным является применение алюмосиликатных пород в качестве добавок к цементу. Эти материалы могут применяться в сырьевой шихте для получения расширяющегося компонента, содержащего сульфаталюминат кальция. За счет введения таких добавок в цемент (10–20%) удается повысить прочностные показатели образцов при сжатии и изгибе [12]. Породы, богатые аморфным кремнеземом и/или глиноземом (например, опоки), представляют ценность с точки зрения применения их в качестве активной минеральной добавки при помолке с цементным клинкером. Однако при содержании в минеральном сырье органических веществ (угля) необходима предварительная термообработка, которая дает возможность еще и значительно активировать материал.

На основе кремнеземистого сырья с существенным содержанием наноразмерной минеральной компоненты (опоки) разработаны составы гранулированного наноструктурирующего заполнителя пролонгированного действия для получения конструкционно-теплоизоляционных бетонов [13, 14]. В результате использования такого заполнителя в бетонных изделиях на 8–10% снижается водопоглощение и в 1,8–2 раза уменьшается средняя плотность композита.

Крупнотоннажным потребителем глинистого алюмосиликатного сырья может стать дорожно-строительная отрасль. Эти породы в виде отходов горных выработок могут применяться для отсыпки слоев насыпи

взамен природных грунтов, требующих разработки, в районе строительства автомобильных дорог, прилегающих к месторождениям, имеющим подобные материалы в отвалах. Применение осадочных пород в земляном полотне в настоящее время является наиболее эффективным, поскольку практически не требует дополнительной переработки материала, а объемы материала для насыпей требуются значительные.

Другим направлением может стать применение их в качестве компонента комплексного вяжущего, а также укрепляемого материала при устройстве оснований дорожных одежд при использовании органических и неорганических вяжущих. Например, на основе глины опоконидной было разработано композиционное грунтоизвестковое вяжущее для укрепления грунтов [15].

Термическая обработка алюмосиликатных пород при умеренной температуре 300–900°C, обоснование которой было дано ранее, способствует, во-первых, удалению нежелательных примесей, например органических (угля), а во-вторых, значительной активации минеральных частиц. В результате дегидратации глинистых минералов образуются аморфные и псевдокристаллические фазы, интенсивно взаимодействующие с гидроксидом кальция, что способствует повышению пуццолановой активности. Исходя из описанной особенности можно утверждать, что наиболее рационально использовать полученные материалы как активные минеральные добавки в вяжущих известково-пуццоланового типа, портландцементе, пуццолановом портландцементе и автоклавных материалах. Например, введение до 20% термообработанных глинистых пород в цементное вяжущее изменяет процессы гидратации в результате взаимодействия вышеописанных продуктов и гидроксида кальция и соотношение гидратных фаз, что приводит к повышению прочности цементного камня при сжатии и изгибе, не снижая при этом интенсивности роста прочности при длительном твердении [12]. Стоит отметить, что, несмотря на увеличение содержания глинозема в цементе, повышается плотность цементного камня и стойкость к сульфатной коррозии в результате образования низкоосновных гелеобразных гидросиликатов кальция и снижения содержания портландита.

На основе алюмосиликатного сырья были получены кристаллизационные добавки путем их термообработки с последующим добавлением концентрированной серной кислоты до состояния пластичности [12]. В результате удается получить высокую марочную прочность цементного камня за счет активизации процессов гидратации неорганического вяжущего, а формирование в процессе гидратации дополнительного количества этtringита позволяет получить безусадочный и даже расширяющийся цементы.

Перспективным направлением применения термомодифицированного сырья может стать их использование в качестве активных минеральных добавок для известково-глинистых и сульфатно-глинистых вяжущих [6].

Использование термоактивированных кремнеземсодержащих пород в качестве сырьевых компонентов композиционных вяжущих (вяжущих низкой водопотребности, тонкомолотых цементов) позволяет снизить количество дорогостоящего цемента в составе вяжущего и сократить энергоемкость при помолке сырьевых материалов, что было подтверждено экспериментально [16].

Доказана возможность применения алюмосиликатных пород в своем естественном виде в материалах автоклавного твердения в качестве компонента известково-кремнеземистого вяжущего и заполните-

лей [17]. Однако можно предположить, что эффективность применения термообработанного сырья в растворах и бетонах гидротермального твердения будет выше за счет увеличения физико-химической активности, интенсификации процессов структурообразования и увеличения прочности материалов [6, 18, 19]. В частности, проведены исследования, в которых показано улучшение физико-механических характеристик прессованных силикатных автоклавных материалов при использовании алюмосиликатного сырья после разной степени температурного воздействия [20].

В бетонах и растворах термомодифицированные алюмосиликатные породы могут служить не только активными минеральными добавками в составе вяжущих, но и выполнять функции заполнителей. Предпосылками этого является положительный опыт применения горелых пород различных угольных месторождений, которые являются природными аналогами искусственно термообработанных алюмосиликатных осадочных пород, в качестве заполнителей в мелкозернистые плотные и пористые, а также легкие бетоны [4]. При использовании глинистых материалов определенного состава (например, с примесями углеродного вещества, снижающего пластичность и связующую способность) в своем естественном виде (без термической обработки) в качестве мелкого заполнителя в цементные бетоны и растворы необходимо проведение исследований и технико-экономическое обоснование.

Термомодифицированные алюмосиликатные материалы благодаря высоким огнеупорным свойствам мо-

гут найти применение в жаростойких бетонах в качестве тонкомолотой добавки и заполнителей.

Наряду с высокой гидравлической активностью, характеризующейся взаимодействием с гидроксидом кальция, термообработанные породы обладают значительной адсорбционной активностью и сцеплением с органическими вяжущими, что позволяет рекомендовать их в качестве заполнителей и наполнителей в асфальтовые вяжущие, бетоны и полимерминеральные композиции [4, 6]. Экспериментально установлено, что после обработки при температуре 500–600°C удается получить наполнители для асфальтовяжущих, которые, во-первых, обладают стабильными свойствами при воздействии воды, а во-вторых, имеют на поверхности высококорреакционные активные центры, позволяющие добиться высокого сцепления битума с поверхностью минеральных частиц. В результате асфальтовые вяжущие отличаются достаточно высокими показателями физико-механических свойств [21].

Приведенные факты свидетельствуют о значительном расширении областей использования глинистых алюмосиликатных пород осадочной толщи в результате их термической обработки. Отмеченные изменения в алюмосиликатных осадочных породах и появляющиеся достоинства будут способствовать также повышению качественных показателей синтезируемых композиций, что делает применение термически модифицированного алюмосиликатного сырья весьма актуальным, технологически и технически оправданным при производстве различных видов строительных материалов полифункционального назначения.

Список литературы

1. Сидоренко А.В., Лунева О.Н. К вопросу о литологическом изучении метаморфических толщ. М.: АН СССР, 1961. 176 с.
2. Лебедев М.С., Потапова И.Ю., Лютенко А.О. Особенности состава алюмосиликатного сырья с точки зрения его использования для получения дорожно-строительных материалов // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2013. № 5 (52). С. 70–74.
3. Лебедев М.С., Жерновский И.В., Фомина Е.В., Потапова И.Ю. Аспекты применения инфракрасной спектроскопии алюмосиликатных сырьевых компонентов в строительном материаловедении // *Технические науки – от теории к практике: сборник статей по материалам XXIV Международной заочной научно-практической конференции*. Новосибирск: Изд-во «СибАК», 2013. С. 94–105.
4. Книгина Г.И. Строительные материалы из горелых пород. М.: Стройиздат, 1966. 208 с.
5. Лебедев М.С. Обоснование выбора температуры обработки минеральных компонентов в промышленности строительных материалов и дорожном строительстве. *Materiały VIII Międzynarodowej naukowej-praktycznej konferencji «Nauka: teoria i praktyka – 2012»*. Przemysł. Nauka i studia. 2012. Vol. 12. Str. 58–60.
6. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 368 с.
7. Фомина Е.В., Кожухова Н.И., Пальшина Ю.В., Строкова В.В., Фомин А.Е. Влияние механоактивации на размерные параметры алюмосиликатных пород // *Строительные материалы*. 2014. № 10. С. 28–33.
8. Ходыкин Е.И., Фомина Е.В., Николаенко М.А., Лебедев М.С. Рациональные области использования

References

1. Sidorenko A.V., Luneva O.N. K voprosu o litologicheskome izuchenii metamorficheskikh tolshch [About lithologic study of metamorphous mass]. Moscow: AN SSSR. 1961. 176 p.
2. Lebedev M.S., Potapova I.Yu., Lyutenko A.O. Features of aluminosilicate raw composition in the context of usage in road-building materials. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2013. No. 5 (52), pp. 70–74. (In Russian).
3. Lebedev M.S., Zhernovsky I.V., Fomina E.V., Potapova I.Yu. Aspects of application of IR-spectroscopy for aluminosilicate raw components in construction materials sciences. «Engineering sciences – from theory to practice»: Proceedings of XXIV International correspondence research and practice conference. Novosibirsk. 2013, pp. 94–105. (In Russian).
4. Knigina G.I. Stroitel'nye materialy iz gorelykh porod [Construction materials from burnt rocks]. Moscow: Stroizdat. 1966. 208 p.
5. Lebedev M.S. Rationale for choosing of temperature treatment for mineral components in constructions materials industry and road construction. *Materiały VIII Międzynarodowej naukowej-praktycznej konferencji «Nauka: teoria i praktyka – 2012»*. Przemysł. Nauka i studia. 2012. Vol. 12, pp. 58–60. (In Russian).
6. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. Stroitel'nye materialy iz otkhodov promyshlennosti [Construction materials based on industrial wastes]. Rostov-on-Don: Feniks. 2007. 368 p.
7. Fomina E.V., Kozhukhova N.I., Pal'shina Yu.V., Stroikova V.V., Fomin A.E. Effect of mechanoactivation on dimensional parameters of aluminosilicate rocks. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 10, pp. 28–33. (In Russian).
8. Khodykin E.I., Fomina E.V., Nikolaenko M.A., Lebedev M.S. Rational fields of application of coal strip mine

- сырья угольных разрезов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2009. № 3. С. 125–128.
9. Лютенко А.О., Лебедев М.С., Строкова В.В. Анализ отходов горной добычи как потенциального источника сырья для производства дорожно-строительных материалов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 445–449.
 10. Равич Б.М., Окладников В.П., Лыгач В.Н. и др. Комплексное использование сырья и отходов. М.: Химия, 1988. 288 с.
 11. Ходыкин Е.И. К проблеме использования топливосодержащих отходов в промышленности строительных материалов: монография. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2000. 40 с.
 12. Ходыкин Е.И. Техногенные минеральные добавки для производства поргланцементного клинкера: монография. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2003. 96 с.
 13. Строкова В.В., Соловьева Л.Н., Максаков А.В., Огурцова Ю.Н. Механизм структурообразования строительных композитов с гранулированным наноструктурирующим наполнителем // *Строительные материалы*. 2011. № 9. С. 64–65.
 14. Строкова В.В., Лозовая С.Ю., Соловьева Л.Н., Огурцова Ю.Н. Прогнозирование свойств конструкционно-теплоизоляционного бетона на основе гранулированного наноструктурирующего наполнителя // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. № 1. С. 15–19.
 15. Лютенко А.О., Ходыкин Е.И., Щеглов А.Ф., Николаенко М.А. Композиционное вяжущее на основе попутно-добываемых пород угольных месторождений для укрепления грунтов в дорожном строительстве // *Строительные материалы*. 2009. № 7. С. 22–24.
 16. Носова А.Н., Фомина Е.В. Термоактивация опалкристобалитовой породы – отхода Коркинского угольного месторождения // «Технические науки – от теории к практике»: сборник статей по материалам XXIV Международной заочной научно-практической конференции. Новосибирск: Изд-во «СибАК», 2013. С. 106–111.
 17. Володченко А.Н., Ходыкин Е.И., Строкова В.В. К проблеме использования попутно-добываемого сырья угольных месторождений для производства автоклавных силикатных материалов // «Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов»: сборник докладов Международной научно-практической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2010. Ч. 1. С. 110–113.
 18. Виноградов Б.Н. Сырье для производства автоклавных силикатных бетонов. М.: Стройиздат, 1966. 131 с.
 19. Лесовик В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород. М.: АСВ. 2006. 526 с.
 20. Строкова В.В., Алфимова Н.И., Черкасов В.С., Шаповалов Н.Н. Прессованные силикатные материалы автоклавного твердения с использованием отходов производства керамзита // *Строительные материалы*. 2012. № 3. С. 14–15.
 21. Лебедев М.С., Строкова В.В., Жерновский И.В., Потапова И.Ю. Изменение свойств минеральных порошков из алюмосиликатного сырья под влиянием термической модификации // *Строительные материалы*. 2012. № 9. С. 68–70.
- raw materials. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2009. No. 3, pp. 125–128. (In Russian).
9. Lyutenko A.O., Lebedev M.S., Strokova V.V. Analysis of mining wastes as potential source of raw materials for road-building materials production. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013. Vol. 31 (50). Part 2. Stroitel'nye nauki, pp. 445–449. (In Russian).
 10. Ravich B.M., Okladnikov V.P., Lygach V.N. i dr. Kompleksnoe ispol'zovanie syr'ya i otkhodov [Complex use of raw materials and wastes]. Moscow: Khimiya. 1988. 288 p.
 11. Khodykin E.I. K probleme ispol'zovaniya toplivosoderzhashchikh otkhodov v promyshlennosti stroitel'nykh materialov: monografiya [To problem of application of fuel-bearing wastes in constructions materials industry: monograph]. Belgorod: BelGTASM. 2000. 40 p.
 12. Khodykin E.I. Tekhnogennye mineral'nye dobavki dlya proizvodstva portlandtsementnogo klinkera: monografiya [Industrial mineral additives for Portland cement clinker producing: monograph]. Belgorod: BelGTASM. 2003. 96 p.
 13. Strokova V.V., Solov'eva L.N., Maksakov A.V., Ogurtsova Yu.N. Structure formation mechanism for construction compositions with granulated nano-structuring aggregate. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 9, pp. 64–65. (In Russian).
 14. Strokova V.V., Lozovaya S.Yu., Solov'eva L.N., Ogurtsova Yu.N. Properties forecasting of structural-insulating concrete on basis of granulated nano-structuring aggregate. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2011. No. 1, pp. 15–19. (In Russian).
 15. Lyutenko A.O., Khodykin E.I., Shcheglov A.F., Nikolaenko M.A. Composite binder on basis of by-product rocks of coal deposits for soil stabilization in road construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 7, pp. 22–24. (In Russian).
 16. Nosova A.N., Fomina E.V. Thermoactivation of the opal-cristobalite rock – waste of Korokino coal deposit. «Engineering sciences – from theory to practice»: *Proceeding of XXIV International correspondence research and practice conference*. Novosibirsk. 2013, pp. 106–111. (In Russian).
 17. Volodchenko A.N., Khodykin E.I., Strokova V.V. To problem of application by-product raw materials of coal deposits for producing autoclave silicate materials. «Scientific studies, nanosystems and resource-saving technologies in constructions materials industry»: *book of reports of International research and practice conference*. Belgorod. 2010. Part. 1, pp. 110–113. (In Russian).
 18. Vinogradov B.N. Syr'e dlya proizvodstva avtoklavnykh silikatnykh betonov [Raw materials for autoclave silicate concretes production]. Moscow: Stroizdat. 1966. 131 p.
 19. Lesovik V.S. Povyshenie effektivnosti proizvodstva stroitel'nykh materialov s uchedom genezisa gornykh porod [Efficiency enhancement of construction materials taking into account the rock's genesis]. Moscow: ASV. 2006. 526 p.
 20. Strokova V.V., Alfimova N.I., Cherkasov V.S., Shapovalov N.N. Pressed silicate materials of autoclave hardening with the use of claydite production waste. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 3, pp. 14–15. (In Russian).
 21. Lebedev M.S., Strokova V.V., Zhernovskiy I.V., Potapova I.Yu. Changing of properties of mineral fillers based on aluminosilicate raw materials under thermal modification. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 9, pp. 68–70. (In Russian).

Как подготовить к публикации научно-техническую статью



Журнальная научно-техническая статья — это сочинение небольшого размера (до 3-х журнальных страниц), что само по себе определяет границы изложения темы статьи.

Необходимыми элементами научно-технической статьи являются:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;
- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение ранее не решенных частей общей проблемы, которым посвящена статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных результатов;
- выводы из данного исследования и перспективы дальнейшего поиска в избранном направлении.

Научные статьи рецензируются специалистами. Учитывая открытость журнала «Строительные материалы»® для ученых и исследователей многих десятков научных учреждений и вузов России и СНГ, представители которых не все могут быть представлены в редакционном совете издания, желательно представлять одновременно со статьей отношение ученого совета организации, где проведена работа, к представляемому к публикации материалу в виде сопроводительного письма или рекомендации.

Библиографические списки цитируемой, использованной литературы должны подтверждать следование автора требованиям к содержанию научной статьи.

НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ:

1. Включать ссылки на федеральные законы, подзаконные акты, ГОСТы, СНИПы и др. нормативную литературу. Упоминание нормативных документов, на которые опирается автор в испытаниях, расчетах или аргументации, лучше делать непосредственно по тексту статьи.

2. Ссылаться на учебные и учебно-методические пособия; статьи в материалах конференций и сборниках трудов, которым не присвоен ISBN и которые не попадают в ведущие библиотеки страны и не индексируются в соответствующих базах.

3. Ссылаться на диссертации и авторефераты диссертаций.

4. Самоцитирование, т. е. ссылки только на собственные публикации автора. Такая практика не только нарушает этические нормы, но и приводит к снижению количественных публикационных показателей автора.

ОБЯЗАТЕЛЬНО следует:

1. Ссылаться на статьи, опубликованные за последние 2–5 лет в ведущих отраслевых научно-технических и научных изданиях, на которые опирается автор в построении аргументации или постановке задачи исследования.

2. Ссылаться на монографии, опубликованные за последние 5 лет. Более давние источники также негативно влияют на показатели публикационной активности автора.

Несомненно, что возможны ссылки и на классические работы, однако не следует забывать, что наука всегда развивается поступательно вперед и незнание авторами последних достижений в области исследований может привести к дублированию результатов, ошибкам в постановке задачи исследования и интерпретации данных.

ВНИМАНИЕ! С 1 января 2014 г. изменены требования к оформлению статей. Обязательно ознакомьтесь с требованиями на сайте издательства в разделе «Авторам»!

Статьи, направляемые для опубликования, должны оформляться в соответствии с техническими требованиями изданий:

- текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word и сохранен в формате *.doc или *.rtf и не должен содержать иллюстраций;
- графический материал (графики, схемы, чертежи, диаграммы, логотипы и т. п.) должен быть выполнен в графических редакторах: CorelDraw, Adobe Illustrator и сохранен в форматах *.cdr, *.ai, *.eps соответственно. Сканирование графического материала и импорт его в перечисленные выше редакторы недопустимо;
- иллюстративный материал (фотографии, коллажи и т. п.) необходимо сохранять в формате *.tif, *.psd, *.jpg (качество «8 – максимальное») или *.eps с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 115 мм по ширине, цветовая модель CMYK или Grayscale.

Материал, передаваемый в редакцию в электронном виде, должен сопровождаться: рекомендательным письмом руководителя предприятия (института); лицензионным договором о передаче права на публикацию; **распечаткой, лично подписанной авторами**; рефератом объемом до 500 знаков на русском и английском языках; подтверждением, что статья предназначена для публикации в журнале «Строительные материалы»®, ранее нигде не публиковалась и в настоящее время не передана в другие издания; сведениями об авторах с указанием полностью фамилии, имени, отчества, ученой степени, должности, контактных телефонов, почтового и электронного адресов. Иллюстративный материал должен быть передан в виде оригиналов фотографий, негативов или слайдов, распечатки файлов.

В 2006 г. в журнале «Строительные материалы»® был опубликован ряд статей «Начинающему автору», ознакомиться с которыми можно на сайте журнала www.rifsm.ru/files/avtoru.pdf

Подробнее можно ознакомиться с требованиями на сайте издательства <http://www.rifsm.ru/page/7>