

# Stroitel'nye Materialy [Construction Materials] СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ® №9

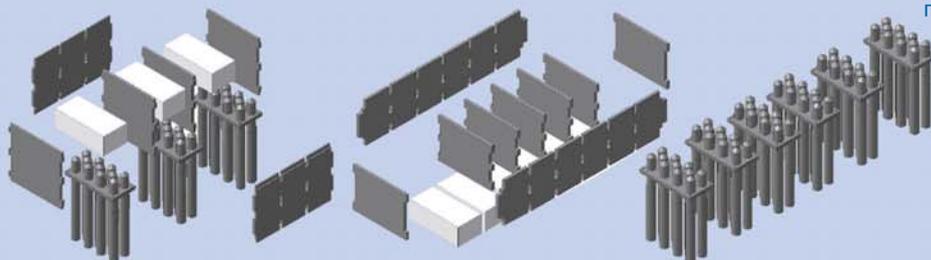


НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ISSN 0585-430X ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU ОКТЯБРЬ 2016 г. (741)



А. Каменев. Церковь мужского монастыря. Пенза. 2014 г.

СМ 152, 294, 816  
СМ 1085 СМК 491  
РА-550  
BSP 500, 600,700  
WKP 600 WKP 750  
АКД 0537  
Донпрессмаш  
Besser



прессы Masa-Henke  
HDP DORSTENER  
VIKING  
HF HAIYUAN  
DRAGON  
FUKAI  
прессы LASCO  
KSP KSE



**Высокоизносостойкая оснастка для кирпичных заводов**  
(8412) 69-82-28 и (8412) 69-82-29 [www.firmavizo.ru](http://www.firmavizo.ru)



**ЗАВОД  
ТЕХПРИБОР**

Тульская обл., г. Щекино  
**ПРЕДЛАГАЕТ**

# МЕЛЬНИЦЫ «ТРИБОКИНЕТИКА»



**miningworld**  
RUSSIA

Диплом за лучшую  
мельницу тонкого помола\*

**ОСМ 2015**

Диплом за лучший  
мельничный комплекс



## Всё перемелется!

\* Диплом за лучшую мельницу тонкого помола российского производства по версии выставки Miningworld Russia.



**Завод «ТЕХПРИБОР» РФ, Тульская область, г. Щекино, ул. Пирогова, д.43**  
Контактные телефоны: (48751) 9-05-95, 9-05-96, 9-05-21, 9-05-46  
E-mail: [manager@tpribor.ru](mailto:manager@tpribor.ru) / [www.tpribor.ru](http://www.tpribor.ru)

**HRIZOPRO**  
Инновационные технологии

**HRIZOPRO**

**ВЫСОКОЕ КАЧЕСТВО  
В ЭКСТРЕМАЛЬНОМ КЛИМАТЕ**

hrizopro.ru  
служба клиентской поддержки 8 800 200 53 10

**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.

(741) сентябрь 2016 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)

**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)

**ЛЕОНОВИЧ 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)

**ШТАКЕЛЬБЕРГ Д. И.**,  
 д-р техн. наук, профессор (Израиль)

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

© ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,  
 журнал «Строительные материалы»®, 2016

## Силикатные строительные материалы

А.А. СЕМЁНОВ

**О текущей ситуации в производстве силикатных стеновых материалов в России . . . . 4**

М.А. ГОНЧАРОВА, А. Н. ИВАШКИН, В.В. СИМБАЕВ

**Разработка оптимальных составов силикатных бетонов с использованием местных сырьевых ресурсов . . . . . 6**

Г.В. КУЗНЕЦОВА

**Известь и ее влияние на техническое перевооружение заводов силикатного кирпича . . . . . 9**

И.А. ГАЛЕЕВ

**Фильтрация масла на прессах для производства силикатного кирпича . . . . . 14**

К. БРАУНГАРДТ

**LASCO поставляет партнерам в России технику индивидуального изготовления для силикатного кирпича и крупноформатных блоков (Информация) . . . . . 18**

И.Ф. ШЛЕГЕЛЬ, Г.Я. ШАЕВИЧ, А.В. РУКАВИЦЫН,  
 А.В. АНДРИАНОВ, А.В. АЛБУТОВ, Ю.М. ШЕРСТОБИТОВ

**Стержневые смесители серии ШЛ в силикатном производстве . . . . . 20**

**Лучший способ создания интерьеров во влажных и мокрых помещениях (Информация) . . . . . 24**

В.Н. ДЕРКАЧ, О.Г. ДЕМЧУК

**Несущая способность при сжатии каменных стен из крупноформатных силикатных блоков . . . . . 26**

**Компания КНАУФ вывела на российский рынок новый уникальный продукт (Информация) . . . . . 32**

А.Н. ВОЛОДЧЕНКО, В.С. ЛЕСОВИК

**Перспективы расширения номенклатуры силикатных материалов автоклавного твердения . . . . . 34**

## Ячеистый бетон: наука и практика

Е.М. ЧЕРНЫШОВ, В.А. ПОПОВ, О.В. АРТАМОНОВА

**Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 5. Эффективное микро-, наномодифицирование систем гидротермально-синтезного твердения и структуры силикатного камня (критерии и условия) . . . . . 38**

В.П. ВЫЛЕГЖАНИН, Д.К.-С. БАТАЕВ, М.А. ГАЗИЕВ, Г.И. ГРИНФЕЛЬД

**Учет влияния карбонизации при расчете длительной деформативности ячеистобетонных изгибаемых конструкций . . . . . 47**

В.Д. ЧЕРКАСОВ, В.И. БУЗУЛУКОВ, Ю.М. БАЖЕНОВ

**Пенообразователи из белков микробного синтеза для производства ячеистых бетонов . . . . . 53**

Г.С. СЛАВЧЕВА, Е.М. ЧЕРНЫШОВ

**Алгоритм конструирования структуры цементных пенобетонов по комплексу задаваемых свойств . . . . . 58**

## Результаты научных исследований

Ю.Р. КРИВОБОРОДОВ, А.А. ЕЛЕНОВА

**Применение микродисперсных добавок для ускорения твердения цемента . . . . . 65**

**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

# STROYTEL'NYE MATERIALY®

№9

Founded in 1955 (741) September 2016 r.

### Editor-in-chief

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

### Editorial Board

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

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

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

**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)

**SHTACKELBERG D.**,  
Doctor of Sciences (Engineering),  
Professor (Israel)

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

### Silicate building materials

A.A. SEMYONOV

**About Current Situation in Production of Silicate Wall Materials in Russia . . . . . 4**

M.A. GONCHAROVA, A.N. IVASHKIN, V.V. SIMBAEV

**Development of Optimal Compositions of Silicate Concretes  
with the Use of Local Raw Resources . . . . . 6**

G.V. KUZNETSOVA

**Lime and Its Influence on Technical Re-Equipment of Silicate Brick Factories. . . . . 9**

I.A. GALEEV

**Filtering Oil in Presses for the Production of Silicate Bricks . . . . . 14**

K. BRAUNGARDT

**LASCO Delivers Individual Manufacturing Equipment for Silicate Bricks  
and Large-Format Blocks to Partners in Russia (Information). . . . . 18**

I.F. SHLEGEL, G.Ya. SHAEVICH, A.V. RUKAVITSYN,  
A.V. ANDRIANOV, A.V. ALBUTOV, Yu.M. SHERSTOBITOV

**Rod Mixer of SHL Series in Silicate Production . . . . . 20**

**The best method for creating interiors in wet and moist premises (Information) . . . . . 24**

V.N. DERKACH, O.G. DEMCHUK

**Bearing Capacity of Masonry Walls Made of Large-Size Silicate Blocks  
under Compression. . . . . 26**

**KNAUF Co. has introduced a new unique product  
at the Russian market (Information). . . . . 32**

A.N. VOLODCHENKO, V.S. LESOVIK

**Perspectives of Expanding Nomenclature of Silicate Materials  
of Autoclave Hardening . . . . . 34**

### Cellular concrete: science and practice

E.M. CHERNYSHEV, V.A. POPOV, O.V. ARTAMONOVA

**Concepts and Substantiations of Nano-Modification Technology  
of Building Composites Structures. Part 5. Efficient Micro-, Nano-Modification  
of Hydrothermal-Synthesis Hardening Systems and Structure of Silicate Stone  
(Criteria and Conditions) . . . . . 38**

V.P. VYLEGZHANIN, D.K.-S. BATAEV, M.A. GAZIEV, G.I. GRINFELD

**Accounting of Influence of Carbonization when Calculating Long-Term  
Deformability of Cellular Concrete Bending Structures. . . . . 47**

V.D. CHERKASOV, V.I. BUZULUKOV, Yu.M. BAZHENOV

**Foaming Agents from Proteins of Microbial Synthesis for Manufacturing Cellular  
Concretes. . . . . 53**

G.S. SLAVCHEVA, E.M. CHERNYSHOV

**An Algorithm of Designing of Cement Foam Concretes Structure According  
to the Complex of Preset Properties . . . . . 58**

### Results of scientific research

Yu.R. KRIVOBORODOV, A.A. ELENOVA

**The Use of Micro-Disperse Additives for Accelerating Cement Hardening . . . . . 65**

**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.

# Строительные материалы № 9

Т.А. НИЗИНА, А.Н. ПОНОМАРЕВ, А.С. БАЛЫКОВ

**Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок** ..... 68

В.А. ВОЙТОВИЧ, И.Н. ХРЯПЧЕНКОВА

**Нанобетон в строительстве** ..... 73

Т.А. ДРОЗДЮК, А.М. АЙЗЕНШТАДТ, М.А. ФРОЛОВА, А.А. НОСУЛЯ

**Оценка активности минерального связующего на основе сапонитсодержащего материала** ..... 76

А.В. КОЧЕТКОВ, Ш.Н. ВАЛИЕВ, С.Ю. АНДРОНОВ, Д.А. КЛИМОВ

**Методы определения теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов** ..... 79

А.А. ЛУКАШ, Н.П. ЛУКУТЦОВА

**Перспективность производства строительных материалов из древесины с ядровой гнилью** ..... 85

## Stroitel'nye Materialy No. 9

T.A. NIZINA, A.N. PONOMAREV, A.S. BALKOV

**Fine Disperse-Reinforced Concretes on the Basis of Complex Modifying Additives** ..... 68

V.A. VOYTOVICH, I.N. KHRYAPCHENKOVA

**Nano-Concrete in Construction** ..... 73

T.A. DROZDYUK, A.M. AIZENSHTADT, M.A. FROLOVA, A.A. NOSULYA

**Assessment of Activity of a Mineral Binder on the Basis of Saponite-Containing Material** ..... 76

A.V. KOCHETKOV, Sh.N. VALIYEV, S.Yu. ANDRONOV, D.A. KLIMOV

**Techniques of Determination of Heat-Physical Properties of Road-Building Materials and Soils** ..... 79

A.A. LUKASH, Candidate of Sciences (Engineering), N.P. LUKUTTSOVA

**Perspectivity of Producing Building Materials from Wood with Heart Rot** ..... 85

### Уважаемые коллеги!

Подписку на журнал «Строительные материалы»®  
всегда можно оформить через редакцию.

Для этого необходимо прислать заявку в произвольной форме  
по тел./факсу: (499) 976-22-08, 976-20-36 или по эл. почте: mail@rifsm.ru.

В заявке надо указать название организации (для выставления счета),  
юридический и почтовый адреса, телефон и контактное лицо.

Открыта **подписка на электронную версию** журнала:

<http://rifsm.ru/page/5/>



На почте подписку можно оформить:

По объединенному каталогу «Пресса России»

индекс **70886**



По каталогу агентства «Роспечать»

индекс **79809**

Оставайтесь  
с нами!

## О текущей ситуации в производстве силикатных стеновых материалов в России

Дан ситуационный анализ производства стеновых силикатных изделий по состоянию на первое полугодие 2016 г. Отмечается тревожная тенденция не только существенного сокращения выпуска продукции, но и уменьшения числа действующих в отрасли предприятий. Также выявлено, что в 2015–2016 гг. силикатные стеновые материалы показали наиболее серьезное снижение производственных показателей среди штучных стеновых материалов. Наиболее сильное падение объемов производства отмечено в Северо-Кавказском, Уральском и Сибирском округах. В январе–июне 2016 г. рост выпуска силикатных стеновых материалов наблюдался только на трех заводах из 67 реально действующих.

**Ключевые слова:** статистика, прогноз, силикатный кирпич, силикатные стеновые материалы.

A.A. SEMYONOV, Candidate of Sciences (Engineering), General Manager (info@gs-expert.ru)  
«GS-Expert», ООО (18, office 207, the 1st Tverskoy-Yamskoy Lane, 125047, Moscow, Russian Federation)

### About Current Situation in Production of Silicate Wall Materials in Russia

The situation analysis of production of wall silicate products as of the first half of 2016 is presented. It is noted, as a disturbing trend, not only the significant reduction in production output but also reduction in the number of operating enterprises of the industry. It is also revealed that in 2015–2016 silicate wall materials show the most serious decrease in production rates among the single-piece wall materials. The most significant drop in production volumes is recorded in the Northern Caucasus, Ural, and Siberia Federal Districts. In January–June of 2016 the growth in the output of silicate wall materials was observed only at three factories from 67 really operating.

**Keywords:** statistics, forecast, silicate brick, silicate wall materials.

Под силикатными стеновыми материалами в данной статье понимаются силикатный кирпич, камни, стеновые и перегородочные блоки.

В последние годы российская силикатная промышленность испытывает серьезные проблемы, связанные как с общим снижением спроса на стеновые материалы в условиях сокращения инвестиционной и строительной активности в стране, так и за счет усиления конкуренции со стороны продуктов-заменителей [1].

По данным Росстата, начиная с 2013 г. в стране наблюдается стабильное сокращение производственных мощностей силикатных заводов [2, 3]. При этом наибольшее снижение отмечено в 2015 г., когда мощности отечественных предприятий сократились на 490 млн шт. усл. кирпича, или на 7%, а с учетом ввода новых и модернизаций действующих производств нетто-снижение мощностей оценивается в 415 млн шт. усл. кирпича (рис. 1), что является самым серьезным падением с 2009 г.

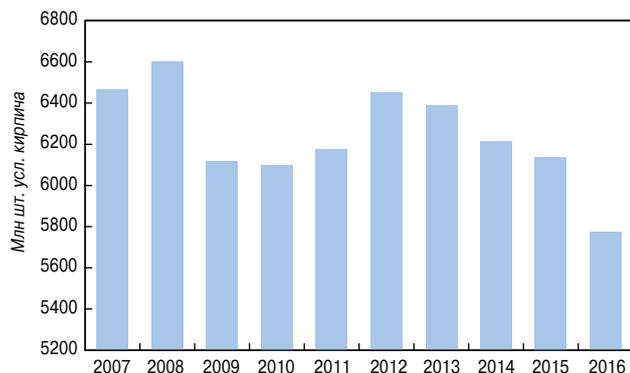
Если в 2015 г. в стране в той или иной степени функционировали 72 завода по выпуску силикатных стеновых материалов из 75, то по состоянию на середину 2016 г. число действующих предприятий снизилось до 67.

При этом многие заводы из-за падения спроса были вынуждены полностью остановить производство в зимний период и возобновили работу только в марте–апреле текущего года, что привело к общему снижению выпуска силикатных стеновых материалов по итогам I квартала на 42%. Часть заводов, преимущественно мелких производителей, по состоянию на август 2016 г. так и не возобновили производство.

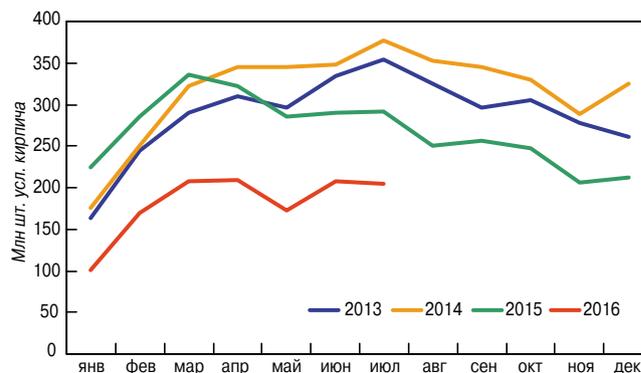
При этом даже в «высокий» строительный сезон лета 2016 г. объемы производства силикатных стеновых материалов в стране не превышают 210 млн шт. усл. кирпича в год (рис. 2). В целом по итогам 7 месяцев текущего года объем производства снизился на 36,8% по сравнению с аналогичным периодом 2015 г.

Если в 2013–2014 гг. темпы роста производства силикатных стеновых материалов существенно превышали темпы роста керамических стеновых материалов, то в 2015–2016 гг. именно силикатные стеновые материалы показали наиболее серьезное снижение производственных показателей (рис. 3).

В январе–июле 2016 г. падение объемов выпуска силикатных стеновых материалов наблюдалось во всех



**Рис. 1.** Изменение суммарной мощности силикатных заводов на начало года. Источник: Росстат, оценка «ГС-Эксперт»



**Рис. 2.** Динамика производства силикатных стеновых материалов в 2013–2016 гг. Источник: Росстат



Рис. 3. Темпы роста производства стеновых материалов в РФ в 2013–2016 гг. Источник: Росстат, оценка «ГС-Эксперт»



Рис. 4. Динамика производства силикатных стеновых материалов в разрезе федеральных округов по итогам 7 месяцев 2016 г. Источник: Росстат, оценка «ГС-Эксперт»

#### Рейтинг ведущих производителей силикатных стеновых материалов в 2015–2016 гг.

Предприятие	Регион	Место в рейтинге		Изменение позиции
		6 мес 2015 г.	6 мес 2016 г.	
ООО «Казанский завод силикатных стеновых материалов»	Республика Татарстан	1	1	-
ЗАО «Воронежский КСМ»	Воронежская обл.	3	2	+1 ↑
ООО «Силикат»	Ульяновская обл.	2	3	-1 ↓
ОАО «Орловский ЗСК» (совместно с Ливенским филиалом)	Орловская обл.	5	4	+1 ↑
ОАО «Навашинский завод стройматериалов»	Нижегородская обл.	7	5	+2 ↑
АО «Яснополянский строительные материалы»	Пензенская обл.	9	6	+3 ↑
ЗАО «Марийский ЗСК»	Республика Марий Эл	6	7	-1 ↓
ООО «Производство силикатного кирпича»	Алтайский край	8	8	-
ООО «Силикатстрой»	Нижегородская обл.	14	9	+5 ↑
ООО «Инвестсиликат-стройсервис»	Тюменская обл.	4	10	-6 ↓

Источник: Росстат, данные предприятий, оценка «ГС-Эксперт».

федеральных округах. Наиболее сильное падение объемов производства отмечено в Северо-Кавказском, Уральском и Сибирском округах (рис. 4).

Около 30% от общего объема производства силикатных стеновых материалов приходится на долю 10 крупнейших предприятий. Безусловным лидером в отрасли на протяжении последних лет остается Казанский завод силикатных стеновых материалов. В 2015 г. предприятие произвело свыше 167 млн шт. усл. кирп. товарной продукции, за 6 мес 2016 г. – около 56 млн шт. усл. кирпича. По итогам первого полугодия текущего года десятка ведущих производителей практически не изменилась. Среди новых лидеров по объемам производства можно отметить ООО «Силикатстрой» (Нижегородская обл.), которое поднялось в рейтинге производителей на 9-е место (см. таблицу).

Однако в целом практически все российские силикатные заводы в текущем году существенно сократили объемы производства. В январе–июне 2016 г. рост выпуска силикатных стеновых материалов наблюдался только на трех заводах: ЗАО ПО «ЗСК» (Волгоградская обл.),

ОАО «НЗСМ» (Чувашская Республика) и ООО «Завод силикатных материалов» (Саратовская обл.).

Тем не менее, по оценкам экспертов, период наиболее серьезных потрясений в отрасли все же миновал. В стране начинает восстанавливаться финансирование строительного комплекса. Если по итогам 2015 г. объем выданных ипотечных кредитов сократился более чем на треть, а объем кредитования строительных компаний снизился почти на 20%, что привело в минувшем году к существенному снижению закладки новых строительных объектов и «заморозке» ряда реализуемых проектов, то в первом полугодии 2016 г. ситуация с финансированием отрасли стала улучшаться. По данным ЦБ РФ, кредитование строительных предприятий увеличилось на 6% по сравнению с аналогичным периодом предыдущего года (что все еще ниже уровня инфляции, однако негативный тренд прошлого года изменился), объем выданных ипотечных кредитов вырос на 44%. Таким образом, уже в следующем году силикатная промышленность может показать рост производственных показателей.

#### Список литературы

- Семёнов А.А. Анализ состояния российского рынка силикатного кирпича // *Строительные материалы*. 2010. № 9. С. 4–5.
- «Социально-экономическое положение России. 2015 год». Федеральная служба государственной статистики, № ИМ-04-1/30-СД. Москва. 09.02.2016.
- Семёнов А.А. Перспективы развития строительного комплекса и промышленности строительных материалов в 2016 г. // *Строительные материалы*. 2016. № 1–2. С. 4–6.

#### References

- Semenov A.A. The Analysis of State of the Russian Silicate Brick Market. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 9, pp. 4–5. (In Russian).
- Socio-Economic Situation of Russia. 2015", Federal State Statistics Service, No. IM-04-1/30-SD, Moscow, 09.02.2016.
- Semyonov A.A. Prospects of Development of Construction Complex and Building Materials Industry in 2016. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 1–2, pp. 4–6. (In Russian).

УДК 691.175.2

М.А. ГОНЧАРОВА, д-р техн. наук (magoncharova777@yandex.ru);

А.Н. ИВАШКИН, инженер, В.В. СИМБАЕВ, инженер

Липецкий государственный технический университет (398600, г. Липецк, ул. Московская, 30)

## Разработка оптимальных составов силикатных бетонов с использованием местных сырьевых ресурсов

Представлены результаты оптимизации составов силикатного бетона автоклавного твердения. Исследовано влияние добавки отходов металлургического производства – конвертерного шлака – на формовочные свойства силикатной смеси, прочность сырца, а также на прочность и долговечность готового кирпича. Отмечено изменение цвета силикатных материалов с течением времени, а также снижение поверхностной прочности. Предложены способы упрочнения и декорирования готовых изделий из силикатного бетона автоклавного твердения.

**Ключевые слова:** силикатный бетон, поверхностное окрашивание, конвертерные шлаки, упрочнение поверхности.

M.A. GONCHAROVA, Doctor of Sciences (Engineering) (magoncharova777@yandex.ru); A.N. IVASHKIN, Engineer, V.V. SIMBAEV, Engineer  
Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, 398600, Lipetsk, Russian Federation)

### Development of Optimal Compositions of Silicate Concretes with the Use of Local Raw Resources

Results of the optimization of compositions of silicate concrete of autoclave hardening are presented. The effect of adding metallurgical production waste, converter slag, on the molding properties of the silicate mixture, green strength, as well as on the strength and durability of ready-made brick has been studied. The change in color of silicate materials with time as well as the reduction in surface strength is observed. Methods for strengthening and decorating ready-made products of silicate concrete of autoclave hardening are proposed.

**Keywords:** silicate concrete, surface coloring, converter slag, surface strengthening.

Применение автоклавного силикатного бетона и изделий на его основе, например силикатного полнотелого кирпича в жилищном домостроении имеет длинную историю. Активное применение силикатного кирпича в строительстве началось в первой половине 1950-х гг. Жилые дома, построенные в этот период, реализовывались в основном в силикатном кирпиче с толщиной наружной стены 640 мм.

В настоящее время изделия из силикатного бетона прочно занимают свою нишу материалов строительного рынка; с развитием каркасного домостроения на смену силикатному кирпичу приходят более эффективные газосиликатные блоки, используемые в ограждающих конструкциях. Поэтому вопросы повышения эффективности и оптимизации составов силикатного бетона являются в настоящее время актуальной задачей.

Развитие кристаллохимии, термодинамики, геохимии гидротермальных процессов, идеи В.Ф. Журавлева о проявлении вяжущих свойств соединениями щелочноземельных металлов с различными оксидами, исследования школ П.И. Боженова, Ю.М. Бутта и В.В. Тимашева, А.В. Волженского, Г.И. Книгиной, Д.И. Чемоданова, Е.М. Чернышова дало возможность доказать, что в качестве исходного сырья для гидро-

термального синтеза цементирующих веществ автоклавного бетона могут применяться отходы производства, содержащие основные и кислотные оксиды. В результате этого цементирующие вещества автоклавных материалов могут слагаться не только из гидросиликатов кальция, но и из других видов гидратных образований [1].

Благодаря механизму гидротермального синтеза возможно наиболее полное и комплексное использование многих видов промышленных отходов, в том числе металлургических.

Прямой ответ на вопрос о возможном гидротермальном синтезе соединений на основе железа дается в монографии Е.М. Чернышова и Н.Д. Потамосневой [2]. Исходные железосодержащие компоненты, сухие исходные смеси и продукты,

полученные после автоклавной обработки этих смесей, подвергались анализу дифференциально-термическим, рентгенофазовым, электронно-микроскопическим и ИК-спектроскопическим методами. Путем сопоставительного рассмотрения результатов этих анализов для исходных и обработанных в автоклаве систем идентифицировались новообразования [2].

Известково-кремнеземистое вяжущее – важнейший компонент силикатной смеси, определяющий в значительной степени формовочные свойства силикатной смеси, прочность сырца, а также прочность и долговечность готового кирпича.

Конвертерные шлаки производства ПАО «НЛМК» представляют фактически многокомпонентный сырьевой материал с преобладаю-



Рис. 1. Образцы силикатного бетона на отходах металлургии до и после автоклавной обработки

щей массовой долей оксидов кальция, кремния и железа с примесями. При этом необходимо учитывать, что конвертерные шлаки могут выступать в двойной роли. С одной стороны, они могут заменять известь в вяжущем, взаимодействовать с гидроксидом кальция в гидротермальных условиях и являться основой синтеза цементирующих веществ, а с другой — своим остаточным объемом образовывать совместно с возникающими цементирующими веществами структуру силикатного микробетона (подобно микробетону Юнга) [3].

Таким образом, наличие оксидов кальция и железа в составе конвертерных шлаков должно оказывать влияние на величину массовой доли активного оксида кальция в смеси. Установлено, что каждой величине удельной площади поверхности конвертерных шлаков отвечает свой оптимум массовой доли  $\text{CaO}_{\text{акт}}$  (и соответственно этому оптимальная цементация материала) по критерию максимума прочности силикатного микробетона и составляет для конвертерных шлаков с удельной площадью поверхности частиц  $S_{\text{уд}} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$ , 16–17%; для  $S_{\text{уд}} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$ , 17,5–18,5%; для  $S_{\text{уд}} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ , 23,5–24,5%. Величина максимальной прочности при этом соответственно 23–25, 27–29, 32–33 МПа.

При составлении вяжущего необходимо учитывать конкретные особенности сырьевых материалов и данного технологического процесса. Применительно к технологическому процессу и исходным сырьевым материалам Липецкого региона оптимальным является извещково-кремнеземистое вяжущее фазового состава 1:1 [4].

Количественное содержание конвертерного шлака в смеси должно способствовать достижению требуемой плотности материала и возможности протекания гидротермального синтеза, придающего силикатному кирпичу более высокие технические показатели. Предварительными исследованиями было выявлено, что конвертерные шлаки текущего выхода могут содержать свободную известь в количестве до 4% в сильно рекристаллизованном состоянии, которая должна быть загидратирована на стадии подготовки сырьевой смеси. Для этого конвертерный шлак, используемый в качестве компонента вяжущего, предварительно

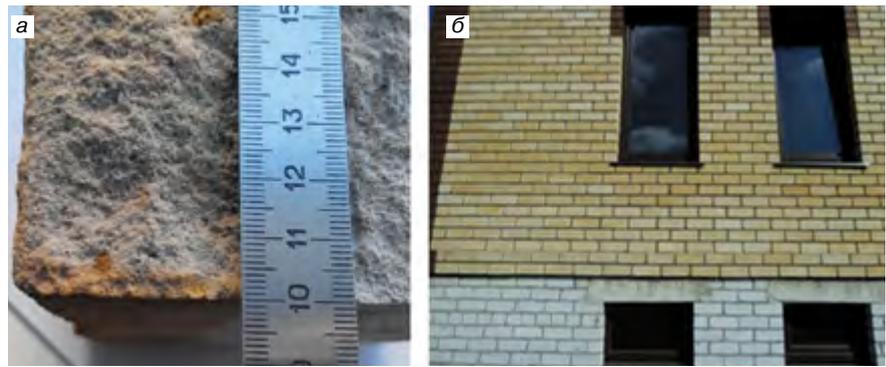


Рис. 2. Скол силикатного кирпича после окрашивания (а); фрагмент кирпичной кладки из окрашенного силикатного кирпича (б)

обрабатывали в автоклаве при давлении пара 0,8 МПа в течение 8 ч. После этого он может играть роль основного компонента в составах силикатных бетонов.

В результате использования отходов металлургии прирост прочности составляет от 5 до 40%. Также выявлено, что наиболее благоприятно влияет на свойства следующее сочетание добавок из отходов металлургии: конвертерный шлак в количестве 10% от массы извести и микрокремнезем в количестве 10% от массы молотого кварцевого песка, что еще раз подтверждает полученные ранее результаты использования этих компонентов (прирост прочности составляет около 50%). Испытания на морозостойкость показали, что силикатный бетон оптимальных составов выдерживает испытания на морозостойкость до 300 циклов. При этом образцы из контрольной партии после испытаний на морозостойкость снижали свои прочностные показатели, а образцы оптимальных составов с отходами металлургии увеличили прочность при сжатии в среднем на 12%. Что касается исследований бетонов на прочность при сжатии в водонасыщенном состоянии, то оптимальным следует считать состав с микрокремнеземом за счет создания более плотной структуры. Водопоглощение повышается незначительно и для оптимальных составов составляет в среднем 6,9%.

При этом необходимо отметить изменение окраски мелкоштучных силикатных материалов с применением техногенного сырья. По данным [5–7], в течение первых 10 лет эксплуатации цвет силикатного кирпича стабильно становится серым, а поверхностный слой подвергается сильной деструкции.

Механизм и характер разрушения силикатного кирпича опреде-

ленно указывают на необходимость упрочнения лицевого слоя совместно с его окрашиванием или защитой от выцветания.

На кафедре строительного материаловедения и дорожных технологий Липецкого ГТУ разработаны составы красителей, позволяющие путем обработки поверхностного слоя силикатного кирпича добиться его равномерного окрашивания. В течение последних трех лет были произведены длительные испытания контрольных образцов силикатного кирпича в реальных условиях эксплуатации в кирпичной кладке. В рамках эксперимента было окрашено четыре тысячи штук силикатного кирпича, из которого выполнена облицовка одноэтажного многоквартирного жилого дома.

К настоящему времени изменение цвета, образование высолов, а также снижение поверхностной прочности силикатного кирпича не наблюдаются (рис. 2).

Исследование протекающих в структуре автоклавного силикатного бетона и изделий на его основе процессов и изменений является актуальной задачей. Ее решение позволит более достоверно прогнозировать поведение материала и конструкций в последующий период эксплуатации.

Полученные результаты исследований позволяют наметить перспективу дальнейших работ по оптимизации составов силикатных бетонов автоклавного твердения и изделий на их основе. Основной задачей при этом является повышение долговечности изделий в целом, придание им новых, в том числе декоративных свойств, а также максимальное снижение себестоимости за счет применения местных сырьевых материалов и повышения технологичности производства.



**Список литературы**

1. Гончарова М.А., Чернышов Е.М. Формирование систем твердения композитов на основе техногенного сырья // *Жилищное строительство*. 2014. № 12. С. 19–22.
2. Чернышов Е.М., Потамосшнева Н.Д. Материаловедение и технология автоклавных бетонов на основе хвостов обогащения железистых кварцитов. Воронеж: ВГАСУ, 2004. 160 с.
3. Гончарова М.А., Корвяков Ф.Н. Выявление механизма участия конвертерных шлаков в структурообразовании эффективных строительных композитов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2014. № 36 (55). С. 54–58.
4. Гончарова М.А., Каширина Н.А. Прогнозирование вяжущих свойств конвертерных шлаков посредством анализа их химического состава // *Actualscience*. 2016. Т. 2. № 7. С. 58–59.
5. Бабков В.В., Самофеев Н.С., Чуйкин А.Е. Силикатный кирпич в наружных стенах зданий: анализ состояния, прогноз долговечности и способы ее повышения // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 8. С. 35–40.
6. Кнатко М.В., Горшков А.С., Рымкевич П.П. Лабораторные и натурные исследования долговечности (эксплуатационного срока службы) стеновой конструкции из автоклавного газобетона с облицовочным слоем из силикатного кирпича // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 8. С. 20–26.
7. Гончарова М.А., Ивашкин А.Н., Каширская О.А. Оценка качества лицевой поверхности изделий из многокомпонентных декоративных бетонов // *Жилищное строительство*. 2014. № 12. С.19–22.

**References**

1. Goncharova M. A., Chernyshov E. M. Forming of systems of curing of composites on the basis of technogenic raw materials. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing construction]. 2014. No. 12, pp. 19–22. (In Russian).
2. Chernyshov E. M., Potamoshneva N.D. Materialovedeniye i tekhnologiya avtoklavnykh betonov na osnove khvostov obogashcheniya zhelezistykh kvartsitov [Materialovedeniye and technology of autoclave concrete on the basis of tails of enrichment of ferriferous quartzites]. Voronezh: VGASU, 2004. 160 p.
3. Goncharova M.A., Korvyakov F.N. Identification of the mechanism of participation of converter slags in structuring of effective construction composites. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2014. No. 36 (55), pp. 54–58. (In Russian).
4. Goncharova M.A., Kashirina N.A. Forecasting of the knitting properties of converter slags by means of the analysis of their chemical composition. *Actualscience*. 2016. V. 2. No. 7, pp. 58–59. (In Russian).
5. Babkov V.V., Samofeev N.S., Chuykin A.E. A silicate brick in external walls of buildings: analysis of a condition, forecast of durability and methods of its increase. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2011. No. 8, pp. 35–40. (In Russian).
6. Knatko M.V., Gorshkov A.S., Rymkevich P.P. Laboratory and natural researches of durability (operational service life) of a wall design from an autoclave gas concrete with a facing layer from a silicate brick. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2009. No. 8, pp. 20–26. (In Russian).
7. Goncharova M. A., Ivashkin A. N., Kashirskaya O. A. A quality evaluation of a front surface of products from multicomponent decorative concrete. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing construction]. 2014. No. 12, pp. 19–22. (In Russian).



**Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I**

**Министерство транспорта РФ**

**Федеральное агентство железнодорожного транспорта**



**22–25 ноября 2016 г.**

**г. Санкт-Петербург**

Международная научно-практическая конференция, посвященная 100-летию д.т.н. проф. О.В. Кунцевича

**«Строительные материалы, конструкции и сооружения XXI века»**

**Основные направления работы конференции**

- Секция 1.** Актуальные проблемы материаловедения  
**Секция 2.** Современные строительные конструкции и сооружения: проблемы и перспективы  
**Секция 3.** Стандартизация и метрологическое обеспечение на транспорте и в строительстве  
**Секция 4.** Контроль качества строительных материалов, изделий, конструкций и сооружений

**Ключевые даты:**

- 01.07.16** прием заявок на участие и аннотаций докладов  
**22.09.16** прием полных версий статей  
**30.07.16** ранняя оплата организационного взноса со скидкой 30%  
**30.10.16** оплата полной стоимости организационного взноса

Рабочие языки конференции – русский и английский  
 Более подробная информация на сайте

<http://www.pgups.ru/events>

Информационный партнер конференции – журнал



Тел.: +7 (812) 310-99-44; Тел/факс +7 (812) 457-86-86; Тел. 8 (921) 774-00-60 E-mail: [buildconf2016.pgups@gmail.com](mailto:buildconf2016.pgups@gmail.com)

Председатель орг. комитета **Сорвачева Юлия Андреевна**

УДК 666.973.6

Г.В. КУЗНЕЦОВА, инженер (kuznecova.gal@yandex.ru)

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1)

## Известь и ее влияние на техническое перевооружение заводов силикатного кирпича

Вопросы усиления конкуренции на рынке стеновых материалов, повышения качества продукции невозможно решать без перевооружения заводов. Замена работоспособного оборудования, не обеспечивающего должный уровень современной технологии, и выбор нового, широко представленного на рынке импортного оборудования ставят вопросы совместимости с местными материалами, одним из которых является известь. Нельзя считать перевооружением замену только прессового оборудования, которое также требует стабильной по составу формовочной смеси. Даны анализ и результаты исследований влияния быстрогасящейся извести на работу оборудования в технологической цепочке. Приведены данные влияния активности извести, вяжущего и содержания их в смеси на качество формовочной смеси, а также параметров гашения извести на конструкцию смесительного оборудования и условия перемешивания при приготовлении смеси. Правильная расстановка современного оборудования в технологической цепочке с учетом качества сырьевых компонентов – залог успешной работы всего производства.

**Ключевые слова:** силикатный кирпич, активность извести, известь, известково-кремнеземистое вяжущее, мельницы.

G.V. KUZNETSOVA, Engineer (kuznecova.gal@yandex.ru)

Kazan State University of Architecture and Engineering (1, Zelenaya Street, 420043, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation)

### Lime and Its Influence on Technical Re-Equipment of Silicate Brick Factories

Due to the increasing competition at the market of wall materials manufactures, the problems of improving the quality of products can't be solved without re-equipment of factories. Replacement of operational equipment which don't provide an adequate level of contemporary technology and selection of the new import equipment widely presented at the market, raise the problem of compatibility with local materials, one of which is lime. Replacement of the press equipment only which in turn needs the molding mixture of stable composition can't be considered as re-equipment. The analysis and results of the study of the influence of quick-slaking lime on the equipment operation in the processing chain are presented. Data on the influence of lime activity, a binder and their content in the mixture on the quality of molding mixture and conditions of mixing in the course of mixture preparation are presented. The correct placement of modern equipment in the processing chain with due regard for the quality of raw components is the key to successful operation of the entire production.

**Keywords:** silicate brick, lime activity, lime-silica binder, mills.

В 1981 г. в СССР работало более 180 предприятий по производству силикатного кирпича; на начало 2015 г. в России действует 93 предприятия мощностью 6,1 млрд шт. усл. кирпича [1].

В настоящее время уже четко определено различие технологий производства силикатных стеновых материалов в России и за рубежом. В Германии, Нидерландах используют прямую технологию, когда сырьевыми материалами служат бездобавочная известь и несколько фракций песка. В РФ технология основывается на приготовлении известково-кремнеземистого вяжущего и на одном виде песка.

#### Основы отечественной технологии:

- использование мелких песков насыпной плотностью менее 1,5 т/м<sup>3</sup> и модулем крупности 0,0–1,6 с собственных карьеров;
- приготовление известково-кремнеземистого вяжущего собственного производства переменного качества;
- помольное отделение с щековыми дробилками, тарельчатыми питателями и приемными бункерами малой вместимости;
- объемное дозирование известково-кремнеземистого вяжущего и песка;
- отсутствие контроля за качеством производимого вяжущего;
- одно- или двухстадийное перемешивание смеси в двухвалных смесителях СМС-246 и СМС-95;
- вторичная обработка в двухвалных смесителях СМС-246 и СМС-95 или стержневом смесителе;
- прессование на револьверных прессах или гидравлических прессах;
- автоклавная обработка;
- отсутствие упаковки или ручная упаковка.

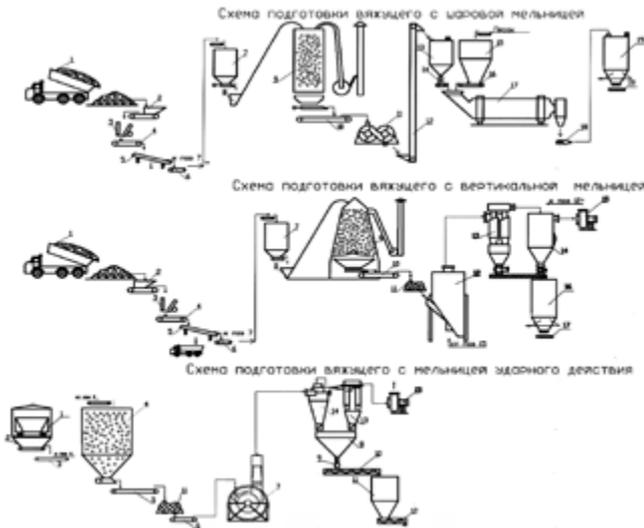
Все вышеперечисленное позволяет выпускать кирпич требуемой сегодня строителями марки по прочности, но вопрос внешнего вида неокрашенного и окрашенного кирпича решается заменой револьверных СМ-816 и СМ-152 на импортные и отечественные прессы нового поколения. Гидравлические прессы нового поколения с электронным управлением обеспечивают экономически выгодное производство изделий различных размеров и гарантируют их высокое качество [2].

Особенностью отечественного производства силикатного кирпича является использование подавляющим большинством заводов извести собственного производства. При этом одни заводы используют известь очень низкого качества, но получают отличный кирпич, но бывает и наоборот. Данное явление наблюдалось в 1980-х гг. в г. Набережные Челны: при содержании активных СаО+МgО в собственной извести 48–52% и активных СаО+МgО в вяжущем 20–24% известь в смеси составляла 4,5–5%; при этом изделия производились на револьверных прессах, характеризовались марочностью выше М200, имели прекрасный внешний вид.

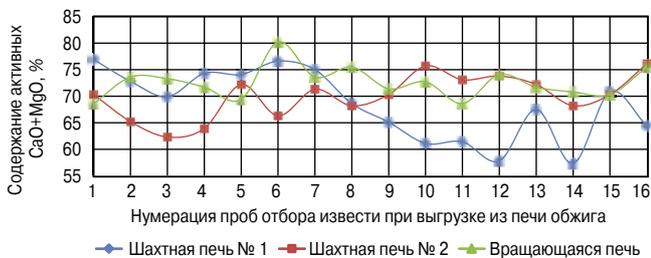
В настоящее время существуют большие возможности по перевооружению предприятий. Можно выбрать между импортным и российским оборудованием, которое к тому же приспособлено под определенную технологию производства.

Исследованиями П.И. Боженова, А.В. Волженского, Л.М. Хавкина и др. в области технологии автоклавных силикатных материалов, и в частности силикатного кирпича, установлено, что качество зависит от ряда технологических факторов, основными из которых являются:

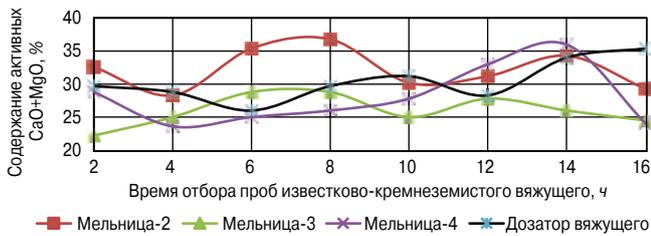
- свойства сырьевых материалов;
- состав известково-песчаного вяжущего и тонаина помола;



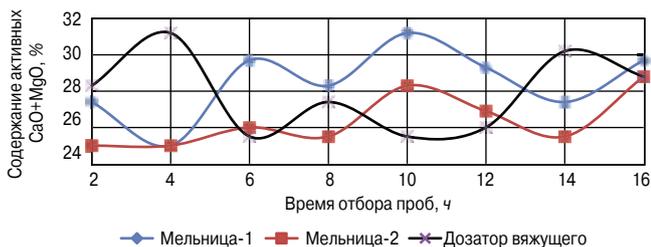
**Рис. 1.** Схемы подготовки известкового вяжущего



**Рис. 2.** Изменение содержания активных CaO+MgO в известке в пробах отбора с конвейера выгрузки печей



**Рис. 3.** Изменение содержания CaO+MgO в вяжущем на выходе с мельниц и с дозатора вяжущего при трех работающих мельницах



**Рис. 4.** Изменение содержания CaO+MgO в вяжущем на выходе с мельниц и с дозатора вяжущего при двух работающих мельницах

- состав формовочной силикатной смеси;
- однородность формовочной силикатной смеси.

Критерием оценки качества сырья является его способность обеспечить изготовление кирпича, по внешнему виду и марке соответствующего стандарту.

Вопросы невозможности просто поменять известково-кремнеземистое вяжущее на известковое уже поднимались. Это повлечет за собой изменение сырцово-прочности, расхода известки, режима автоклавной обработки и др. [3].

Традиционно много внимания уделяется вопросам применения одного вида песка, что характерно для российских предприятий, и шихтовке песков по опыту за-

водов в Германии. На отдельных российских заводах имеет место применение разных песков, но это скорее исключение из общего правила.

Основной задачей при выборе сырьевых материалов является достижение рентабельного содержания CaO, обеспечивающего требуемую прочность изделий после автоклавной обработки [4].

Дополнительными требованиями помимо указанных в табл. 1, предъявляемыми к негашеной известке для производства силикатного кирпича в Германии, являются способность к пластической деформации, мелкозернистость, равномерное изменение объема.

На российских заводах при определении качества помола в основном используют сито с сеткой 0,2. При остатке на сите 0,2 в пределах 2% на сите 0,08 получаем остаток, превышающий 15%. Но зачастую заводские лаборатории не используют сита с сетками 0,08 [5].

Достаточная мелкозернистость и хорошая текучесть необходимы для обеспечения работы дозаторов и равномерности введения известки в смеситель. Особенности сырья учитываются при автоматизации процессов дозирования и приготовления смеси [6].

Известь отличается временем гашения. Привычное для производства силикатного кирпича время гашения составляет 1–2 мин, температура при этом поднимается до 98°C, что не всегда совместимо с импортным оборудованием. Даже несортовая известь активностью 55–68% имеет время гашения 2–4 мин, и максимальная температура при этом достигнет 90°C.

Отечественные производства располагают в основном шахтными печами и редко вращающимися. На рис. 1 приведены схемы подготовки известкового вяжущего с использованием традиционных шаровых мельниц и модернизированных, где шаровые мельницы заменены на вертикальные и ударно-центробежные.

По качеству производимая известь на заводах силикатного кирпича оценивается на уровне третьего сорта и ниже. На одном из предприятий были проведены замеры показателей известки с печей в течение 2 сут. Отбор проб проводился с конвейера выгрузки известки из печи каждые 2 ч. На рис. 2 приведены изменения значений содержания активных CaO+MgO в известке.

Расчетный коэффициент вариации составляет для известки печи № 1 – 10%, для известки печи 2 – 6% и для известки из вращающейся печи – 4%. Предприятия, располагающие двумя и более печами, зачастую не имеют усредняющих емкостей и в производство подают известь поочередно то с одной, то с другой печи.

Следующая технологическая операция – дробление известки в основном производится щековыми дробилками производительностью до 10 т/ч с получением кусков более 20 мм. Дробилки ударно-центробежного действия ОПД-50С и роторные молотковые дробилки СМД-114 и СМД-85 производительностью 55 м³/ч при дроблении дают продукт менее 1 мм при максимальной влажности 6–10%. Максимальный размер загружаемых кусков в молотковую дробилку 200 мм. Замена щековой дробилки на роторную и отладка ее в соответствии с паспортом и влажностью материала позволяют уменьшить размер кусков до 1 мм. При снижении размеров подаваемого материала за счет предварительного дробления производительность мельниц увеличивается до 30% и сокращается расход электроэнергии.

Важным является расположение роторной дробилки перед мельницей. Есть ряд примеров, когда дробилку располагают перед бункерами запаса и страдают от слишком мелкого дробления известки, так как при этом сокращается срок хранения мелкодисперсной известки.

Наибольшее применение в традиционной технологии получили шаровые мельницы, где можно молот несколько компонентов. Российские заводы оснащены в

основном мельницами типа SM1456 и СММ-205 размером 2×10,5 м и польскими мельницами 2×10 м. На многих заводах еще работают неприхотливые и простые в эксплуатации тарельчатые питатели, но повышающиеся требования к качеству вяжущего они уже не обеспечивают. Тарельчатые питатели перед шаровыми мельницами создают проблемы при работе с мелкодисперсной дробленой известью размером менее 5 мм. Их использование для негашеной дробленой извести или смеси извести и песка дает большую погрешность.

**Заводы, работающие по прямой технологии,** используют, как правило, покупную молотую известь. Для помола только одной извести используются мельничные комплексы МТМ, МТW, LM и мельницы ударного действия. Комплексы МТМ и МТW – это усовершенствованные мельницы типа Raymond, которые обеспечивают получение узкофракционированного тонкодисперсного порошка в диапазоне 1,6–45 мкм. Максимальная производительность 20 т/ч. Комплексы LM основаны на вертикальных мельницах немецкой разработки. Тонина помола 170–45 мкм, максимальная производительность 50 т/ч.

Предлагаемые на рынке вертикальные мельницы имеют большое преимущество перед шаровыми – отсутствие мелющих тел и высокое качество помола, но к ним необходима воздухоочистка. Уменьшение тонины помола сокращает время гашения извести.

Установка приборов нагрузки электродвигателя на шаровых мельницах позволяет вовремя реагировать на загрузку мельниц. Увеличение остатка на сите 0,2 подтверждается показаниями приборов о снижении нагрузки на двигатель – износом мелющих тел или крупностью поступающего дробленого материала. Данную операцию уже могут контролировать все технические работники, а работники помольного отделения – своевременно произвести дозагрузку мельниц мелющими телами [5].

Шаровая мельница перерабатывает материал разной влажности и разного состава. Известково-кремнеземистое вяжущее – многокомпонентный материал, сбалансированный и стабильный состав которого обеспечивает успех производства и высокое качество продукции [7].

Вяжущее с мельниц поступает в расходный бункер, где происходит усреднение вяжущего. Изменение активности извести вносит коррективы в активность вяжущего после мельницы и активность усредненного вяжущего в дозаторе. На рис. 3 показаны изменения активности вяжущего в течение суток при работающих трех мельницах и двух мельницах (рис. 4) помольного отделения и дозатором массозаготовительного отделения.

Как можно видеть, в усредняющем бункере тоже происходит колебание активности по СаО, и оно тем больше, чем больше производительность мельниц. Пики активности вяжущего с дозатора появляются в той же последовательности, что и с мельниц. На рис. 4 для сравнения приведена активность вяжущего при двух работающих мельницах.

Как видно из рис. 2, 3, 4, изменение активности вяжущего влияет на активность усредненного вяжущего в дозаторе. С помощью расходных бункеров и усреднения колебания активности вяжущего не устраняется. Колебания активности вяжущего не зависят от количества работающих мельниц, а зависят только от качества извести, полученной из печей, и ее усреднения. Следовательно, замена шаровых мельниц на вертикальные или ударно-центробежные не повлияет на колебания активности извести. Активность вяжущего после шаровых мельниц при постоянном количестве песка, равном 50%, в составе И:К=1:1 показана на рис. 5.

В данном случае активность вяжущего также является величиной переменной и зависящей от активности извести, поступающей с печей обжига. Такая картина

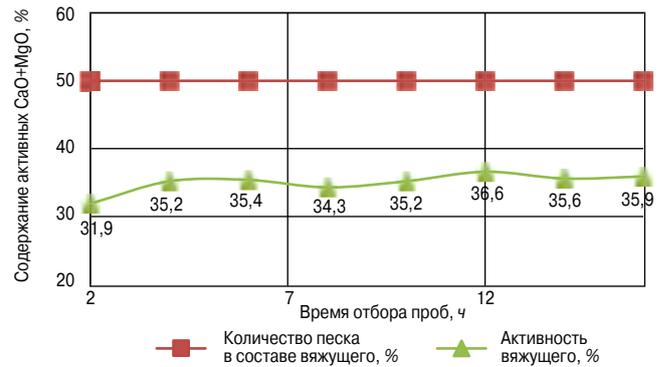


Рис. 5. Изменение активности вяжущего в зависимости от активности извести при постоянном количестве песка в составе вяжущего

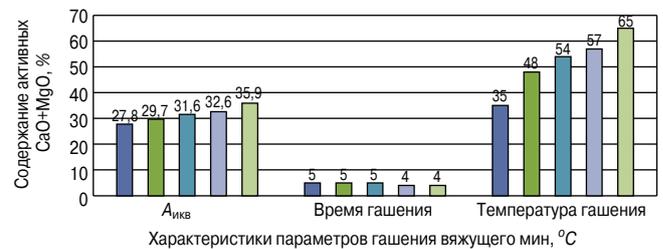


Рис. 6. Влияние изменения состава вяжущего на параметры гашения вяжущего

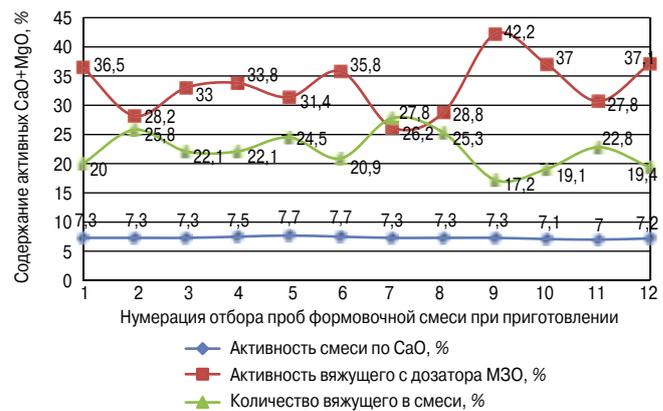


Рис. 7. Влияние качества вяжущего с переменной активностью по СаО на состав смеси

наблюдается на заводах, где производство известково-кремнеземистого вяжущего не контролируется.

Таким образом,  $A_{икв} = f(A_i)$ , где  $A_{икв}$  – содержание активных СаО+MgO в вяжущем (активность вяжущего), %;  $A_i$  – содержание активных СаО+MgO в извести (активность извести с печей).

Перемена состава вяжущего по количеству извести автоматически будет влиять на параметры гашения вяжущего (рис. 6).

Перемена активности вяжущего в дозаторе неизбежно влечет за собой и изменение активности приготавливаемой смеси. На рис. 7 представлено изменение активности вяжущего, смеси и состава смеси по количеству вяжущего на примере одного из заводов.

В данном случае активность смеси является величиной переменной и зависящей от активности вяжущего, поступающего с дозатора. Переменная активность смеси будет оказывать влияние на качество прессования и кирпич-сырец.

Активность смеси является величиной переменной и зависящей от активности вяжущего, поступающего с мельниц.

Таким образом,  $A_{смеси} = f(A_{икв})$ , где  $A_{смеси}$  – содержание активных СаО+MgO в смеси (активность смеси), %;

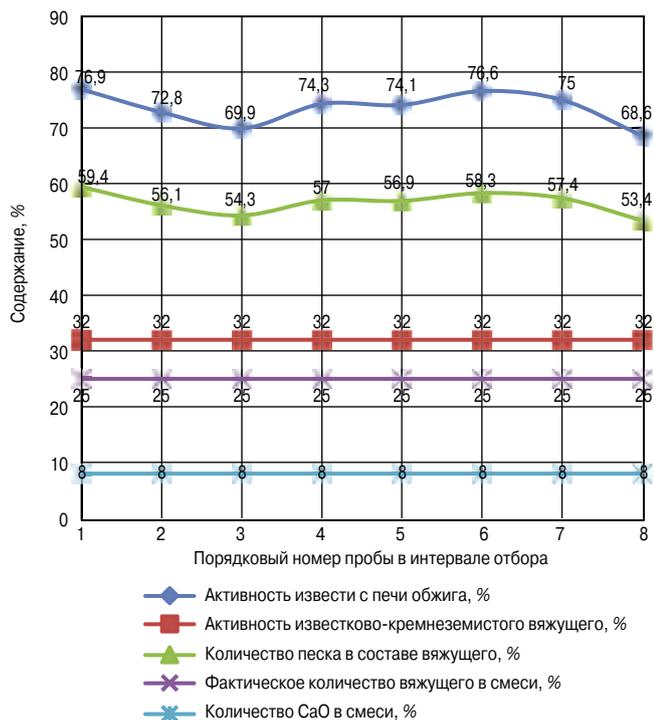


Рис. 8. Влияние качества вяжущего с постоянной активностью по CaO на состав смеси

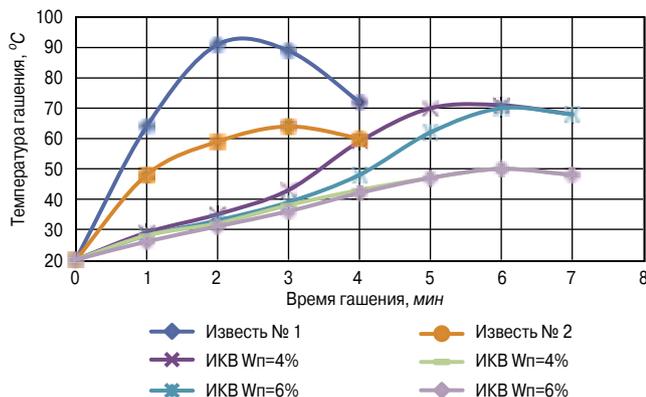


Рис. 9. Влияние влажности песка на время гашения извести и известково-кремнеземистого вяжущего

$A_{ИКВ}$  — содержание активных CaO+MgO в вяжущем (активность вяжущего), %.

Переменность активности вяжущего приводит к неоднородности смеси и превышает предельные значения коэффициента вариации  $C_v=8,7\%$  [8]. Производство цветного кирпича стало требовать уменьшения разброса активности смеси или коэффициента вариации смеси. Можно задаться целью зафиксировать активность вяжущего. Ведь нет же такой проблемы у бетонщиков, работающих на цементе. Тогда вопрос с составом формовочной смеси будет решаться проще. При фиксированной активности вяжущего (содержание активных CaO+MgO) переменным является количество песка в составе вяжущего (рис. 8).

На графике (рис. 8) видно, что для получения вяжущего с постоянной активностью по CaO необходимо изменять количество песка, подаваемого на помол в мельницу. В последующем вяжущее с постоянной активностью по CaO обеспечит при непрерывном способе приготовления смеси постоянство по количеству вяжущего и CaO в смеси.

Естественно, возникает необходимость организации контроля активности вяжущего при помоле. Эта работа

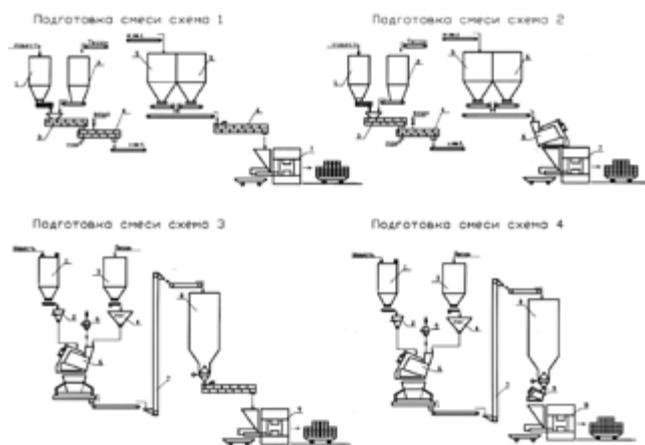


Рис. 10. Схемы подготовки формовочной смеси

легко выполняется лаборантом и оператором мельницы. Усреднение качества получаемого известково-кремнеземистого вяжущего — это достоинство шаровых мельниц, а вяжущее с постоянной активностью по CaO (разброс  $\pm 1\%$ ) — это стабильный состав формовочной смеси, качество прессования и прочность кирпича.

Переход на вертикальные мельницы сокращает цепочку известь—смесь, но сохраняет в смеси все недостатки компонентов. Значение качества извести повышается. Это компенсируется четко подобранным составом песков, плотностью упаковки и др. Вертикальные мельницы и мельницы ударного действия очень хорошо подходят для помола извести в технологии ячеистого бетона.

Ранее уже отмечалось [9], что совместный помол извести и влажного песка изменяет время гашения вяжущего (рис. 9).

Время гашения известково-кремнеземистого вяжущего, приготовленного на влажном песке, увеличивается в два раза по сравнению с временем гашения извести, использованной для изготовления этого вяжущего. Это является важным и надо учитывать при замене смесителей непрерывного действия на периодические. Снова вернемся к времени гашения извести и максимальной температуре гашения (см. таблицу). Для российских заводов нормальная температура гашения извести  $98^\circ\text{C}$ . В технологии отечественных заводов на приготовлении смеси используются смесители СМС-246 и СМС-95 (рис. 10, схема 1, 2). Смеситель СМС-95 имеет два вала с подшипниками на торцевых сторонах корыта и лопастями под углом  $13-22^\circ$ , позволяющими произвести перемешивание в сухом и влажном состоянии. Обслуживание смесителя, если он хорошо установлен, несложное — это в основном замена изношенных и деформированных лопастей. За время перемешивания смесь подсушивается в первом смесителе, увлажняется во втором и на выходе можно наблюдать реакцию гашения извести и вовремя вмешаться, если этого требует качество смеси. Нагревание происходит постепенно и максимально на выходе и загрузки силосов.

Скоростные дискретные смесители обеспечивают хорошую однородность смеси, но при этом могут возникать сложности при первичном перемешивании извести со скоростью гашения 1–2 мин (рис. 10, схема 3, 4). Если при этом у смесителей электродвигатель установлен на крышке, то повышенная температура гашения нагревает подшипник вала электродвигателя, что приводит к остановкам. В этом случае время перемешивания сокращают до минимума ( $\sim 2$  мин), и затем должна следовать быстрая выгрузка. Если же в технологии предусмотрен элеватор для загрузки силосов (рис. 10, схема 3, 4) и гашение происходит во время и после выгрузки, элеваторы залипают. Эта особенность

## Требования к негашеной извести для производства силикатного кирпича

Марка	Содержание СаО, %	Остаток на сите, %		Реакционная способность		
		0,2 мм	0,09 мм	t <sub>ниже 80</sub> , МИН	t <sub>макс</sub> , МИН	T <sub>макс</sub> , °С
Германия						
CL90	≥80	≤2	≤7	1–8	<30	>65
CL80	≥65					53–65
CL70	≥55					48–53
Россия						
Сорт II	≥80	≤1,5	≤15	1–8	<1	>95
Сорт III	≥70					65–98
Несортовая	55–65					53–75
Россия, фактические показатели						
Сорт II	≥80	2–10	15–36	1–4	<1	>95
Сорт III	≥70					65–98
Несортовая	55–65					53–75

учтена при проектировании нового производства на Калужском заводе строительных материалов, где элеватор заменен на конвейер.

Принимая решение о переходе на бездобавочное вяжущее, надо учитывать увеличение расхода извести (по СаО) до 10% при использовании обычного мелкого песка. То, что отработано годами немецкими коллегами по составу и подбору песков, нельзя не учитывать. Купить песок разных фракций возможно и в РФ, его производят для литейного производства и др., но стоимость силикатного кирпича тогда возрастает в разы. В г. Новочебоксарске (Республика Чувашия) есть производство та-

ких песков: цена песка намывного или карьерного составляет 200–300 р./т, а стоимость укрупняющих фракций песка 0,6–1,2 мм; 1,2–2,5 мм составляет более 1 тыс. р/т.

Содержание извести в формовочной смеси в технологии силикатного кирпича обычно составляет 9–12% по прямой технологии и для смеси с известково-кремнеземистым вяжущим 7–9% [10]. Использовании на участке приготовления смеси смесителей периодического действия с электродвигателем на рабочем валу на крышке для извести с временем гашения менее 2 мин и количеством 10–14% затруднительно.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- условия работы производителей силикатного кирпича России и Германии существенно различаются;
- сырьевые компоненты России и Германии имеют существенное различие;
- замена устаревшего оборудования на импортное требует всестороннего изучения и осторожного подхода;
- переход на другую технологию при отсутствии возможности варьирования сырья не всегда обоснован;
- хорошо отработанные участки требуют только замены изношенного оборудования на равноценное или усовершенствования отечественного оборудования и автоматизации процессов;
- техническое перевооружение переводит производство на более высокий уровень самосознания и ответственности обслуживающего персонала, способствует повышению квалификации кадров.

## Список литературы

1. Семенов А.А. Российский рынок силикатных стеновых материалов и вопросы сырьевого обеспечения отрасли // *Строительные материалы*. 2015. № 12. С. 40–43.
2. Сулима-Грудзинский А.В. Некоторые актуальные вопросы в области оборудования для производства силикатных изделий // *Строительные материалы*. 2015. № 3. С. 53–62.
3. Кузнецова Г.В., Морозова Н.Н. Проблемы замены традиционной технологии силикатного кирпича с приготовлением известково-кремнеземистого вяжущего на прямую технологию зарубежных производителей // *Строительные материалы*. 2013. № 9. С. 14–18.
4. Кларе М., Иванов А.К. Применение модульных стеновых элементов для оптимизации производственных процессов // *Строительные материалы*. 2011. № 9. С. 17–20.
5. Кузнецова Г.В. Особенности помола известково-кремнеземистого вяжущего в производстве силикатных материалов // *Строительные материалы*. 2011. № 9. С. 14–17.
6. Кларе Д. Оборудование компании AAC-Concept GmbH для производства силикатного кирпича // *Строительные материалы*. 2011. № 9. С. 25.
7. Кузнецова Г.В., Морозова Н.Н. Влияние компонентов известково-кремнеземистого вяжущего на связность известковой массы для прессования // *Строительные материалы*. 2012. № 12. С. 69–72.
8. Хавкин Л.М. Технология силикатного кирпича. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 384 с.
9. Кузнецова Г.В., Морозова Н.Н. Влияние корректирующей добавки на свойства известково-кремнеземистого вяжущего // *Строительные материалы*. 2013. № 12. С. 12–14.
10. Кузнецова Г.В. Способ прессования силикатного кирпича и метод определения его сырьевой прочности // *Строительные материалы*. 2015. № 12. С. 50–54.

## References

1. Semenov A.A. Silicate Wall Materials Market and Problems of Providing Industry with Raw Materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 12, pp. 40–43. (In Russian).
2. Sulima-Grudzinskiy A.V. Some Actual Problems in the Field of Equipment for Silicate Products Manufacture. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 3, pp. 53–62. (In Russian).
3. Kuznetsova G.V., Morozova N.N. Problems of Replacement of Traditional Technology of Silicate Brick with Preparation of a Lime-Siliceous Binder by Direct Technology. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 9, pp. 14–18. (In Russian).
4. Klare M., Ivanov A.K. Application of modular wall elements for optimization of productions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 9, pp. 17–20. (In Russian).
5. Kuznetsova G.V. Features of a grinding limy and silicic knitting in production of silicate materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 9, pp. 14–17. (In Russian).
6. Klare D. Equipment of the AAC-Concept GmbH company for production of a silicate brick. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 9, pp. 25. (In Russian).
7. Kuznetsova G.V., Morozova N.N. Influence of Components of a Lime-Siliceous Binder on Cohesion of Molding Material for Pressing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 12, pp. 69–72. (In Russian).
8. Khavkin L.M. Tekhnologiya silikatnogo kirpicha [Technology of a silicate brick]. Moscow: Ekolit. 2011. 384 p.
9. Kuznetsova G.V., Morozova N.N. Influence of a Corrective Additive on Properties of a Lime-Siliceous Binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 12, pp. 12–14. (In Russian).
10. Kuznetsova G.V. Method for Pressing of Silicate Brick and Method for Defining Its Raw Strength. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 12, pp. 50–54. (In Russian).

УДК 621.979:666.965.2

И.А. ГАЛЕЕВ, генеральный директор

ООО «Инвест-Технология» (454119, г. Челябинск, ул. Нахимова, 20П)

## Фильтрация масла на прессах для производства силикатного кирпича

Рассмотрены основные стандарты (действующие и не действующие), который регламентируют классификацию чистоты масла – ISO 4406 (1999 г.) и NAS 1638. Показаны отличия каждого класса чистоты. Описаны принципы назначения чистоты масла для гидросистем прессов в зависимости от применяемых гидравлических компонентов. Приведены рекомендации ведущих компаний в области гидравлических систем и показаны отличия системы фильтрации масла на прессах VIKING.

**Ключевые слова:** гидравлический пресс, чистота масла, аксиально-поршневой насос, гидравлический фильтр, фильтрация масла

I.A. GALEEV, General Director

ООО «Invest-Tekhnologiya» (20, structure П, Nakhimova Street, 454119, Chelyabinsk, Russian Federation)

### Filtering Oil in Presses for the Production of Silicate Bricks

Main standards (in force and invalid) which regulate the classification of the oil purity – ISO 4406 (1999) and NAS 1638 are considered. Differences of each class of purity are shown. Principles of the specification of oil purity for hydro-systems of presses depending on the used hydraulic components are described. Recommendations of the leading companies in the field of hydraulic systems are presented; differences of the oil filtration system of VIKING presses are shown.

**Keywords:** hydraulic press, oil purity, axial-piston press, hydraulic filter, oil filtration.

Масло является ключевым компонентом в работе гидравлических прессов и основные проблемы, связанные с работой гидравлической системы прессов, имеют прямое отношение к чистоте масла.

При разработке прессов серии VIKING были тщательно изучены рекомендации ведущих производителей гидравлических компонентов, а также опыт эксплуатации гидравлических прессов, в результате чего был выявлен ряд противоречий между исходными данными по характеристикам гидравлического оборудования и рекомендациями ведущих производителей компонентов и были выработаны технические решения для исключения проблем с чистотой масла.

Международный стандарт, дающий классификацию по чистоте масла ISO 4406, также имеет существенный пробел в методике классификации, который позволяет допускать ошибки при проектировании гидросистем. В этом случае ошибочно спроектированная гидросистема формально будет удовлетворять требованиям стандарта ISO и требованиям изготовителей гидравлических компонентов.

#### Как стандарты классифицируют масло по классам чистоты

Основным стандартом, который регламентирует классификацию чистоты масла, является стандарт ISO 4406 (1999 г.). Стандарт NAS 1638 в настоящее время отменен, но зачастую упоминается в литературе, так как код по NAS 1638 очень прост в использовании и состоит всего из одной цифры (класс 1, класс 2, ... класс 6 и т. д.), и во многих случаях вместе с кодом ISO добавляются комментарии о том, какому классу по NAS соответствует данный код ISO. Каждый класс отличается от предыдущего в 2 раза по количеству допустимых частиц загрязнения, т. е. в классе 7 по NAS в 2 раза больше частиц, чем в классе 6, а в классе 8 по NAS в 4 раза больше частиц, чем в классе 6. Аналогичные соотношения и в кодах по ISO.

По стандарту ISO 4406 в 1 см<sup>3</sup> пробы масла определяют количество загрязняющих частиц размером свыше 4, 6 и 14 мкм (с), после чего по таблице 1 определяются коды, которые через дробь указываются в классе чистоты по ISO. Например, если в масле содержится 2000 частиц размером ≥ 4 мкм (с)/1 мл, 600 частиц размером ≥ 6 мкм (с)/1 мл и 15 частиц размером ≥ 14 мкм (с)/1 мл, то это будет код по ISO 18/16/11.

#### Как назначается чистота масла для гидросистемы пресса в зависимости от применяемых гидравлических компонентов

Как правило, для гидросистемы пресса назначается класс чистоты масла по наиболее чувствительному к загрязнению компоненту. Например, если в прессе используются пропорциональные клапаны, то класс чистоты должен быть 17/15/12 по ISO (6-й класс по NAS). Если пропорциональные клапаны отсутствуют, а наиболее чувствительным к загрязнению компонентом является, например, аксиально-поршневой насос, который предъявляет требования к маслу по классу чистоты 19/17/14 по ISO, то для гидросистемы в целом назначается класс 19/17/14 по ISO (8-й класс по NAS).

#### Рекомендации по очистке масла, которые дают ведущие изготовители гидравлических компонентов

Исследования компании Bosch Rexroth говорят о том, что «даже частицы, составляющие 1/3 от зазоров (в гидрокомпонентах) могут привести к засорению зазоров. Поэтому тонкость фильтрации системы должна быть выбрана таким образом, чтобы фильтрация по абсолютному значению обеспечивала очистку как минимум в три раза меньше наименьшего зазора в системе». Если следовать вышеуказанным рекомендациям, то тонкость фильтрации по абсолютному значению должна быть около 0,17 мкм, но в практических рекомендаци-

Распределение классифицирующих чисел

Классифицирующее число		21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
Количество частиц на 1 мл	От	10000	5000	2500	1300	640	320	160	80	40	20	10
	До	20000	10000	5000	2500	1300	640	320	160	80	40	20



Рис. 1. Гидробак с сапуном (воздушным фильтром) с тонкостью фильтрации 2–3 мкм

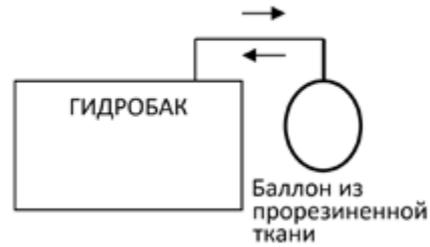


Рис. 2. Гидробак с герметичным баллоном из прорезиненной ткани

ях для обеспечения чистоты масла 19/17/14 по ISO (8-й класс по NAS), которое требуется для аксиально-поршневых и шестеренных насосов, производители гидрокомпонентов рекомендуют применять фильтры с тонкостью фильтрации 3 мкм. При этом, рекомендуется использовать гидробак с сапуном (воздушным фильтром, см. рис. 1) с тонкостью фильтрации не более 3 мкм.

#### В чем проявляются противоречия в рекомендациях изготовителей гидрокомпонентов?

Практика показывает, что использование сапунов в гидравлических баках приводит к проникновению в гидросистему пресса огромного количества мелких частиц размером менее 2–3 мкм в зависимости от тонкости фильтрации сапуна, которые негативно сказываются на работе гидравлических компонентов. В частности, компания Bosch Rexroth в рекомендациях абсолютно однозначно указывает на то, что необходимо отфильтровывать частицы размером от 1/3 критических зазоров, т. е. от 0,17 мкм (более подробно см. выше).

При работе прессов в сильно загрязненных производствах, к которым относится производство силикатного кирпича, эффект проникновения в гидросистему прессов загрязняющих абразивных частиц через сапуны особенно заметен, и при длительной эксплуатации на дне гидробаков скапливается слой мелкой пыли. При этом толщина слоя пыли (в зависимости от периодичности очистки бака) может составлять 1 см и более.

Количество частиц пыли при этом составляет поистине астрономическую величину. Например, в 1 мл пыли размером в 1 мкм количество частиц будет составлять один триллион ( $10^{12}$ ). А если гидробак имеет размер  $2 \times 1$  м и толщина слоя пыли составляет 1 см, то количество скопившихся частиц на дне бака будет составлять 20 квадриллионов ( $2 \times 10^{16}$ ).

Следует отметить, что мелкие частицы могут оседать на дне гидробака в период длительных простоев, например в период новогодних праздников. Если таких длительных простоев у пресса нет, то вся эта мелкая пыль циркулирует в гидравлическом масле пресса.

При тонкости гидравлического фильтра 3 мкм, который рекомендуется производителями компонентов, все эти частицы размером менее 3 мкм, проникающие в гидросистему через сапун, не будут отфильтровываться масляным фильтром и, соответственно, с течением времени будут только накапливаться в системе и наносить ей ущерб в виде износа гидрокомпонентов.

Таким образом, с одной стороны, производители гидрокомпонентов говорят о том, что присутствие в масле частиц размером более 0,17 мкм является критическим, а с другой стороны, они же рекомендуют использовать воздушные сапуны, которые беспрепятственно пропускают частицы абразивных загрязнений размером менее 2 мкм в запредельных количествах, а

применяемые масляные фильтры никоим образом не удаляют указанные частицы. При этом формально, с точки зрения ISO 4406, наличие в масле такого огромного количества частиц размером менее 2 мкм не является проблемой, так как ISO учитывает только частицы размером от 4 мкм (с). На наш взгляд, это является серьезным недостатком в стандартизации чистоты масла, поскольку имеются явные противоречия между пониманием того, каким должна быть чистота безопасного масла, и тем, какие требования к чистоте масла предъявляют стандарты.

#### Фильтрация масла на прессах VIKING

При разработке прессов VIKING были учтены рекомендации ведущих производителей гидрокомпонентов по уровню чистоты масла, а также опыт эксплуатации прессов с использованием сапунов. В результате разработаны технические решения, которые по сравнению со схемой фильтрации, использующей воздушные сапуны, имеет ряд существенных преимуществ и позволяют обеспечивать значительно более высокий уровень чистоты масла.

В прессах VIKING отсутствуют сапуны. Вместо них используется замкнутая система, в которой воздух временно накапливается в специальных емкостях (баллонах) из прорезиненной ткани (рис. 2), а затем возвращается обратно в систему. В этом заключается отличие от традиционной системы, в которой воздух из гидросистемы сначала удаляется в атмосферу, а затем засасывается из атмосферы через сапуны с тонкостью фильтрации 2–3 мкм. Преимущества: замкнутая система не вовлекает в гидробак вместе с воздухом мелкую пыль размером  $< 2$  мкм; практически не требует обслуживания; отсутствует необходимость покупать сменные фильтроэлементы и в процессе эксплуатации их регенерировать.

Поскольку в систему с воздухом не вовлекается пыль размером  $< 2$  мкм, это позволяет использовать масляный фильтр с тонкостью фильтрации 1 мкм, что практически невозможно сделать при использовании сапуна, так как в гидросхеме с сапуном фильтр с тонкостью фильтрации 1 мкм будет очень быстро засоряться частицами размером 1–2 мкм.

Применение вышеуказанных технических решений позволяет добиться значительно более качественной очистки масла на прессах VIKING по сравнению с традиционной схемой фильтрования масла, которую рекомендуют производители гидрокомпонентов, а именно с применением сапунов на гидробаках, и которая повсеместно используется на прессах по производству силикатного кирпича.

В связи с этим на все гидравлические узлы пресса VIKING предоставляется гарантия три года без ограничения наработки.

#### Список литературы

1. Свешников В.К. Гидрооборудование. Кн. 3. Вспомогательные элементы гидропривода: Номенклатура, параметры, размеры, взаимозаменяемость. М.: Издательский центр «Техинформ» МАИ. 2003. 445 с.

#### References

1. Svshnikov V.K. Hidroequipment. Book 3. Auxiliary elements of the hydraulic drive: nomenclature, characteristics, sizes, interchangeability. M. Publishing center «Tekhinform» MAI. 2003. 445 p.



**Технология производства стеновых цементно-песчаных изделий**

**Ю.З. Балакшин, В.А. Терехов**

Справочное пособие  
М.: РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,  
2012. 276 с.

Авторы многие годы отдали работе в промышленности строительных материалов и накопили значительный объем знаний и технических документов производстве стеновых материалов не только из опыта работы промышленности в СССР и России, но и многих предприятий Европы, Америки и Азии.

В книге описано производство и применение стеновых материалов методом вибропрессования из цементно-песчаных бетонов. Рассмотрена существующая и перспективная номенклатура изделий и их свойства. Описаны сырьевые материалы для производства цементнопесчаных изделий. Сформулированы специфические требования к сырьевым материалам, а также рекомендации по подбору состава бетонной смеси. Подробно представлена технология производства цементно-песчаных вибропрессованных стеновых изделий. Особое внимание уделено технологическому контролю на производстве и техническому контролю и обслуживанию оборудования.

Книга предназначена для организации производственно-технического обучения на предприятии, будет полезна инженерно-техническому персоналу.

Тел./факс: (499) 976-22-08; 976-20-36  
www.rifsm.ru



**В.И. Корнеев, П.В. Зозуля**

**СУХИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ СМЕСИ  
СОСТАВ, СВОЙСТВА**

М.: РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ», 2010. – 320 с.

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.

Допущено учебно-методическим объединением в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов».

Стоимость одного экземпляра 900 р. без учета доставки

По вопросам приобретения книги обращаться по тел./факсу: (499) 976-22-08, 976-20-36  
E-mail: mail@rifsm.ru



**Институт строительных материалов им. Ф.А. Фингера (FIB)  
Университета Bauhaus-Universität г. Веймар (Германия)**

**организует III Веймарскую гипсовую конференцию**



**Гипс в строительстве, и не только**

Гипсовая конференция проводится в Веймаре в третий раз и за это время стала площадкой для широкого научного обмена идеями в области вяжущих на основе сульфата кальция и их применения учеными и инженерами стран востока и запада

**г. Веймар (Германия)**

**14–15 марта 2017 г.**

**Основные темы конференции:**

- Вяжущие вещества на основе сульфата кальция
- Вяжущие вещества, содержащие сульфат кальция
- Гидратация и переработка
- Добавки и их эффект
- Стройматериалы и изделия на основе сульфата кальция
- Другие виды применения сульфата кальция
- Сульфаты кальция и сохранение исторического наследия
- Изделия на основе сульфата кальция и их безотказное длительное использование

В рамках конференции будет проходить специализированная выставка.

**Заявки компаний на участие в выставке принимаются до 14 октября 2016 г.**

**Заявки на участие в конференции с докладами принимаются до 25 октября 2016 г.**

Планируется синхронный перевод: немецкий, английский, русский.

**ibausil@uni-weimar.de ibausil@uni-weimar.de ibausil@uni-weimar.de**

# 500 тыс. тонн извести в 2017 году

## Перспективы развития АО «Клинцовский силикатный завод»



АО «Клинцовский силикатный завод» – мощное современное многофункциональное и многопрофильное предприятие. Занимать существенную долю рынка позволяет своевременная и грамотная модернизация производства. Инвестиции в новое оборудование позволяют регулярно расширять номенклатуру выпускаемой продукции.

**Июль 2016 г.** – ввод в эксплуатацию третьей печи обжига извести, что позволило увеличить производство на 140 тыс. т извести в год и вывести завод в лидеры рынка с общей производительностью **360 тыс. т в год.**

**III квартал 2016 г.** – ввод в эксплуатацию мельничного комплекса. Производительность – **19 т/ч молотой извести.**

**IV квартал 2017 г.** – запуск печи № 4 для обжига извести позволит увеличить общий объем производства извести Клинцовским силикатным заводом до **500 тыс. т в год.**

Благодаря собственным сырьевым запасам и производству извести завод также производит и успешно реализует мел, известняковую муку, силикатный кирпич, газосиликатный стеновой блок из ячеистого бетона автоклавного твердения.



КЛИНЦОВСКИЙ  
СИЛИКАТНЫЙ  
ЗАВОД

Офис продаж:

г. Брянск, ул. Красноармейская, 136 Б  
+7 (4232) 41-97-53, 41-09-69  
e-mail: kl-silikat@bk.ru

[www.k-silikat.ru](http://www.k-silikat.ru)

[www.alfigroup.ru](http://www.alfigroup.ru)

Алфигрупп  
холдинговая компания

**EuroBlock®**  
газобетон



**EuroLime®**  
известь



**EuroBrick®**  
кирпич



**EuroChalk®**  
мел



Карстен БРАУНГАРДТ, LASCO Umformtechnik GmbH, г. Кобург (Германия)

# LASCO поставляет партнерам в России технику индивидуального изготовления для силикатного кирпича и крупноформатных блоков

Инвестиционная безопасность и конкурентные преимущества, основанные на серьезной инженерии и гибкой ориентации на индивидуальные пожелания заказчиков, с давних пор являются главной философией, превратившей компанию LASCO Umformtechnik в уважаемого во всем мире поставщика технологий. В России в сфере обработки металлов давлением, а также в сфере производства строительных материалов десятилетиями эксплуатируется оборудование LASCO. Примером этому может служить успешно действующее оборудование на ряде заводов по производству силикатного кирпича в г. Дзержинске Нижегородской обл., г. Коврове Владимирской обл., г. Каменск-Уральском Свердловской обл. и др.

Развитие российского рынка строительных материалов и соответствующие требования к производственной технике в сфере силикатного кирпича тяготеют к более эффективному использованию ресурсов и материальных затрат. Этому может способствовать внедрение в практику производства и строительства изделий более крупного формата, чем кирпич. Не в последнюю очередь доказательством тому является новый российский стандарт ГОСТ 379–2015. Исключительно экономичны при производстве также и системные элементы – крупноформатные блоки. Соответствующие технологии уже продуманы и отработаны на практике. Однако предлагавшееся до недавнего времени на международном рынке оборудование для силикатной промышленности имело инвестиционные препятствия из-за несоответствия нормативной базы для кирпича и оснащенности строительной площадки.

Специально под запросы своих партнеров в России компания LASCO усовершенствовала как номенклатуру своей продукции в секторе производства строительных материалов, так и спектр предлагаемых услуг. Гидравлические прессы одностороннего и двустороннего уплотнения типов KSE 425 В и KSE 1250 В, а также типа KSP (850, 1050 и 1250) естественным образом поддерживают нормы ГОСТ 379–2015. Кроме того, по желанию (и по опыту ряда успешно реализованных проектов подобного рода) компания LASCO поставляет и заводы «под ключ», и комплектные производственные линии для имеющихся заводских цехов. К тому же компания имеет представительство во Владимире (Центральный регион РФ). Занимаясь производством узлов и комплектующих, а также предлагая обширный спектр услуг, представительство работает на успех российских пользователей техники LASCO.



LASCO Umformtechnik – головной завод в г. Кобурге (Германия) более 150 лет разрабатывает, проектирует и изготавливает станочное оборудование для мирового рынка

Установки одностороннего уплотнения KSE 425 В и KSE 1250 В предназначены для изделий высотой до 250 мм. Существенными преимуществами являются компактная конструкция, идеальная при ограниченной глубине подвала и ограниченной высоте цеха, высокая производительность благодаря короткому ходу прессы, а также удобство в обслуживании благодаря расположенному на полу цеха приводному агрегату.

На прессах двустороннего уплотнения серии KSP производятся изделия высотой до 500 мм. Также и для этих агрегатов монтажная площадка адаптирована к условиям российского рынка для полного использования имеющихся ресурсов. Снятие кирпича происходит на усмотрение заказчика слева или справа; в качестве опции также возможен непосредственный съем кирпича или при помощи робота (типовая модификация R). С возможностью дооснащения до отмеченной наградой прессовой системы для производства доборных блоков и элементов примыкания PSP связана уверенность в завтрашнем дне. Прессы серии KSE и серии KSP могут быть на выбор оснащены высокоэкономичным гидравлическим прямым сервоприводом.

Липецкий силикатный завод является показательным примером модернизации и инвестиций в инновационную производственную технику. Вместе с техникой LASCO предприятие создало одно из самых современных силикатных производств в России.

**LASCO UMFORMTECHNIK  
WERKZEUGMASCHINENFABRIK**



## Передовые технологии для производства силикатного кирпича

Пресса LASCO для производства силикатного кирпича и крупноформатных блоков обеспечивают высочайшее качество и рентабельность в их производстве. По этой причине крупные производители также и в России уже много лет доверяют нашим надежным решениям. Сейчас мы усовершенствовали наши технологии специально под требования российского рынка.



ОАО «Липецкий силикатный завод» обладает одним из самых современных и высокопроизводительных силикатных производств в России. Центральным элементом завода являются четыре прессы LASCO KSE 1250 для производства силикатного кирпича.

[www.lasco.com](http://www.lasco.com)

**LASCO UMFORMTECHNIK  
WERKZEUGMASCHINENFABRIK**



LASCO Umformtechnik GmbH · Hahnweg 139 · 96450 Кобург/Германия | Телефон: +49 (0) 9561 642-0 · eMail: lasco@lasco.de

## Собственное представительство в России



Собственное представительство в России позволяет LASCO быстро, просто, надежно и к высочайшему удовлетворению Заказчиков выполнять любые, также и нестандартные решения. Производство деталей и узлов производится по немецким стандартам качества. Расположение в центральном регионе России (180 км от Москвы) обеспечивает быструю и надежную поддержку клиентов LASCO, свободную от таможенно-административных барьеров.

К широкому спектру услуг относятся поставки запасных частей, ремонт и капитальная модернизация прессов (автоматика-электроника), монтаж и запуск в эксплуатацию новых прессов, производство и поставка различных комплектов, а также техническая поддержка при планировании инвестиций в оборудование LASCO.

### ООО ЛАСКО Умформтехник Сервис

Юридический адрес: 600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская 5, корпус 8  
Офис: 600031, г. Владимир, ул. Добросельская 212, офис 308, 309  
Телефон: +7 (4922) 47-93-14 · Моб.: +7-910-182-11-20  
E-Mail: [rainer.scheler@lasco-russia.ru](mailto:rainer.scheler@lasco-russia.ru) · [www.lasco-russia.com](http://www.lasco-russia.com)

**LASCO UMFORMTECHNIK  
WERKZEUGMASCHINENFABRIK**



УДК 666.965:621.929.9

И.Ф. ШЛЕГЕЛЬ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, директор, Г.Я. ШАЕВИЧ<sup>1</sup>, исполнительный директор, А.В. РУКАВИЦЫН<sup>1</sup>, зам. директора, А.В. АНДРИАНОВ<sup>1</sup>, начальник отдела, А.В. АЛБУТОВ<sup>1</sup>, инженер АСУТП; Ю.М. ШЕРСТОБИТОВ<sup>2</sup>, главный инженер

<sup>1</sup> Институт Новых Технологий и Автоматизации промышленности строительных материалов (ООО «ИНТА-СТРОЙ») (644113, г. Омск, ул. 1-я Путевая, д. 100)

<sup>2</sup> ООО «Инвестиционная индустрия» (392525, Тамбовская обл., Тамбовский р-н, п. Строитель, ул. Промышленная, стр. 16)

## Стержневые смесители серии ШЛ в силикатном производстве

Показано, что стержневые смесители являются эффективным оборудованием технологии подготовки силикатной массы. Рассмотрена машиностроительная схема и принцип действия новой конструкции стержневого смесителя ШЛ 506 из серии, разработанной специалистами ООО «ИНТА-СТРОЙ». Приведен пример установки и успешной работы данного смесителя в технологической линии действующего предприятия, выпускающего силикатный кирпич.

**Ключевые слова:** кирпич силикатный, объемное окрашивание, силикатная масса, смеситель стержневой, энергосбережение, экология производства, охрана труда.

I.F. SHLEGEL<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering), Director, G.Ya. SHAEVICH<sup>1</sup>, Executive Director, A.V. RUKAVITSYN<sup>1</sup>, Deputy Director, A.V. ANDRIANOV<sup>1</sup>, Head of Department, A.V. ALBUTOV<sup>1</sup>, Engineer ASUTP; Yu.M. SHERSTOBITOV<sup>2</sup>, Chief Engineer

<sup>1</sup> Institute of New Technologies and Automation of Building Materials Industry («INTA-STROY» Ltd.) (100, 1st Putevaya Street, 644113 Omsk Russian Federation)

<sup>2</sup> ООО «Investment Industry» ( 16 Promyshlennaya Street, Stroitel Settlement, Tambov District, Tambov Oblast, Russian Federation)

### Rod Mixer of SHL Series in Silicate Production

It is shown that the rod mixers are efficient equipment for the technology of silicate mass preparation. The engineering scheme and principle of operation of the new design of the rod mixer SHL 506 from the series developed by specialists of ООО «INTA-STROY» are considered. An example of the unit and successful operation of this mixer in the technological line of the operating enterprise manufacturing the silicate brick is given.

**Keywords:** silicate brick, volume coloring, silicate mass, rod mixer, energy saving, production ecology, protection of labor.

Стержневой смеситель является основной машиной в подготовке сырья силикатных смесей перед прессованием.

Смеситель [1, 2] представляет собой вращающийся барабан, заполненный стержнями, куда подается обрабатываемая смесь, где она перетирается и дополнительно перемешивается.

Качество подготовки силикатной массы является основным преимуществом стержневого смесителя. Популярность этой машины среди силикатчиков объясняется простотой и надежностью конструкции, низкими эксплуатационными затратами.

Опыт эксплуатации стержневых смесителей различных изготовителей позволил выявить и ряд их недостатков:

– высокая запыленность при работе смесителя объясняется негерметичностью узлов подачи и выгрузки смеси;

– повышенный уровень шума связан с применением металлических броневых плит [3];

– открытые бандажные опоры и приводные шестерни являются причиной повышенной опасности, что приводит к установке различных ограничивающих устройств ограждений [3];

– излишняя мощность привода, которая необходима для разгона барабана при его запуске, но не нужна в процессе работы.

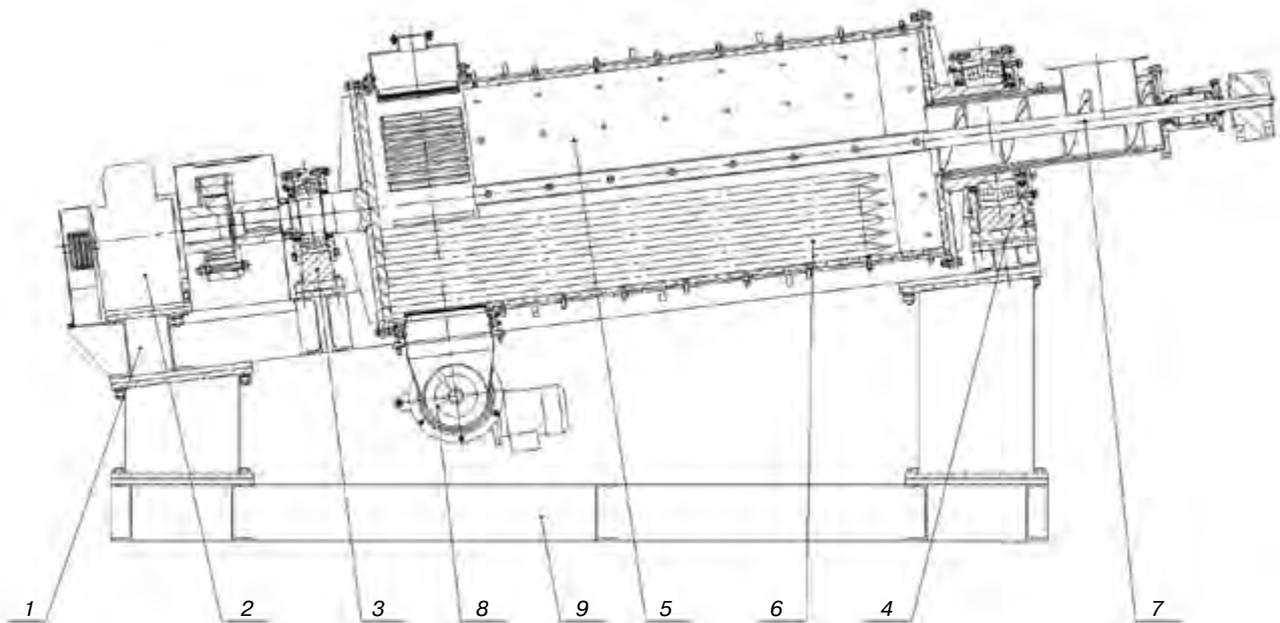
При проектировании типоразмерного ряда стержневых смесителей ООО «ИНТА-СТРОЙ» (см. таблицу) перечисленные недостатки были устранены при сохранении простоты и надежности конструкции.

Рассмотрим конструкцию и основные особенности новых стержневых смесителей на примере смесителя ШЛ 506, установленного на заводе силикатного кирпича ООО «Инвестиционная индустрия» в Тамбове.

Смеситель ШЛ 506 (рис. 1) состоит из основной рамы (1), на которой установлены привод барабана (2) и подшипниковые корпуса (3) и (4), в которых установлен полой вращающийся барабан (5). Внутри барабана, футерованного толстостенной резиной, расположены стержни (6). Шнек загрузки (7) установлен внутри полой цапфы торцевой крышки барабана посредством болтового соединения его фланца с крышкой подшипниковой опоры. Шнек разгрузки (8) установлен под выгрузными колосниковыми окнами барабана и крепится к раме с возможностью разворота на 180°. Рама (1) установлена на стойках, которые крепятся к нижней раме (9), образуя угол 70° между осью барабана и горизонтальной поверхностью. Вращение барабана может осуществляться в любую сторону. Привод барабана состоит из электродвигателя, клиноременной передачи, редуктора и муфты, соединенной с валом торцевой

**Типоразмерный ряд стержневых смесителей ООО «ИНТА-СТРОЙ»**

Индекс	Номинальная производительность, т/ч	Диаметр барабана, мм	Длина барабана, мм
ШЛ 593	2,5	560	1000
ШЛ 594	5	630	1500
ШЛ 506	10	820	2000
ШЛ 596	20	920	2500
ШЛ 597	40	1220	3000
ШЛ 598	80	1700	4000



**Рис. 1.** Смеситель стержневой: 1 – рама; 2 – привод; 3, 4 – корпус подшипника; 5 – барабан; 6 – стержни; 7 – шнек загрузки; 8 – шнек выгрузки; 9 – нижняя рама

крышкой барабана. Ременную передачу и муфту закрывают кожухи. Шнеки загрузки и выгрузки имеют наплавленные твердым сплавом витки и легкоъемные гильзы внутри корпуса, что позволяет производить быстрый ремонт шнеков после наступления критического износа.

Смеситель работает следующим образом. Подвергаемый измельчению и перемешиванию предварительно подсушенный или увлажненный материал влажностью от 7 до 9% подается в шнек загрузки. Шнек загрузки обеспечивает равномерную и контролируемую подачу материала непосредственно в барабан. При вращении барабана происходит обработка массы под действием стержней путем истирания материала стержнями между собой и внутренней поверхностью футерованного корпуса барабана. Наклон барабана в сочетании с вращением вокруг оси обеспечивает перемешивание, перетирание и перемещение массы к окнам выгрузки. Через окна выгрузки с колосниками материал попадает в шнек выгрузки и выводится через течку разгрузки шнека.

Система управления смесителем позволяет встроить машину в любую схему действующего завода. Использо-

вание частотных преобразователей позволяет осуществлять плавный пуск электродвигателя барабана, регулировать и подачу, и отбор материала, синхронизируя их с производительностью. Двойная система защиты двигателей и логика управления машиной в целом позволяет избежать поломок электрооборудования и исключить завал смесителя материалом.

Выбор такой конструкции смесителя ШЛ 506 позволил исключить все недостатки, описанные выше, а именно:

- комплектация смесителя шнеками загрузки и выгрузки полностью исключает пыление, увеличивает качество предварительного перемешивания, обеспечивает равномерную подачу и выгрузку материала;
- внутренняя резиновая футеровка барабана существенно снижает уровень шума, улучшает перетирание и снижает массу конструкции, при этом уменьшаются энергозатраты;
- применение центрального привода с закрытой ременной передачей и муфтой с полиуретановыми вставками позволило уменьшить габариты установки, снизить ударные нагрузки, увеличить безопасность машины;



**Рис. 2.** Смеситель в линии подготовки силикатной массы на заводе ООО «Инвестиционная индустрия» (Тамбов)



**Рис. 3.** Силикатный сырец с добавлением желтого пигмента

- разработанная с применением новейших электроавтоматических комплектующих, система управления стержневым смесителем позволила осуществлять плавный пуск барабана смесителя, снизить мощность основного электродвигателя, в широких пределах изменить производительность и качество перемешивания за счет регулирования частоты вращения барабана.

Стержневой смеситель ШЛ 506, установленный в линию производства цветного силикатного кирпича на заводе ООО «Инвестиционная индустрия» (рис. 2), прошел ряд производственных испытаний и применяется для доизмельчения и перемешивания силикатной смеси с красящим пигментом.

Опыт работы на производстве показал, что с поставленными задачами смеситель успешно справляется. Смесь на выходе имеет гомогенную структуру и доизмельченный состав, что позволяет улучшить формовочные свойства смеси, внешний вид сырца (рис. 3) и готового кирпича при малом количестве добавки красителя (от 0,5 до 1,5% от

общей производительности). Внедрение стержневого смесителя ШЛ 506 в производство позволило выпускать силикатный кирпич различной цветовой гаммы при явном улучшении его качества и внешнего вида. Кроме того, производителями были отмечены низкий уровень шума и отсутствие пыления при работе смесителя.

Эксплуатация смесителя на действующем заводе показала, что стержневой смеситель серии ШЛ ООО «ИНТА-СТРОЙ» является эффективным и надежным оборудованием и может быть рекомендован для использования в технологических линиях по подготовке силикатных масс.

Охрана труда и промышленная экология в современном мире – вопрос серьезный и требует новейших решений и постоянной модернизации мощностей. Экологическая безопасность на предприятии – это определенный комплекс мер. Решению задач этих важнейших направлений способствуют разработанные смесители серии ШЛ.

### Список литературы

1. Шлегель И.Ф., Гришин П.Г., Мирошников В.Е. Смеситель стержневой ШЛ-313 // *Строительные материалы*. 2002. № 7. С. 32–33.
2. Вахнин М.П., Анищенко А.А. Производство силикатного кирпича. М., 1989. 199 с.
3. Хвостенков С.И., Винтайкин В.П., Кошлаев В.И., Купершмидт М.Э. Наклонный стержневой смеситель для обработки силикатных масс // *Строительные материалы*. 1981. № 6. С. 13–14.

### References

1. Shlegel' I.F., Grishin P.G., Miroshnikov V.E. Mixer rod ShL-313. 1. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2002. No. 7, pp. 32–33. (In Russian).
2. Vahnin M.P., Anishhenko A.A. Proizvodstvo silikatnogo kirpicha [Production of a silicate brick]. Moscow, 1989, 199 p.
3. Hvostenkov S.I., Vintajkin V.P., Koshlaev V.I., Kupersmidt M.Je. The inclined rod mixer for processing of silicate masses. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1981. No. 6, pp. 13–14. (In Russian).



**ИНТА-СТРОЙ**  
ИНСТИТУТ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И АВТОМАТИЗАЦИИ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ООО «ИНТА-СТРОЙ», 644113, Омск, ул. 1-я Пугачева, 100  
Тел.: (3812) 35 65 44, 35 65 45. E-mail: info@inta.ru. Http: www.inta.ru



## РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СИЛИКАТНОЙ И КИРПИЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

- ▀ в существующих разработках применено более 50 патентов;
- ▀ штат специалистов разных направлений;
- ▀ возможность в кратчайшие сроки разработать оборудование, в том числе по вашим заказам.



МЫ ЗВЕНЬЯ ОДНОЙ ЦЕПИ

# masa

Milestone to your success.

## Наши решения – Ваш успех



[www.masa-group.com](http://www.masa-group.com)

Фирма «Маза» предлагает отдельные машины и участки производственных линий, а также установки «под ключ» для промышленного производства строительных материалов: мелкоформатных бетонных изделий, бордюрного камня, декоративных плит мощения, силикатного кирпича, газобетонных изделий.

Фирма «Маза» осуществляет разработку индивидуальных технических решений, проектирование, изготовление оборудования, его монтаж и ввод в эксплуатацию. Наш Клиент сможет оценить все преимущества работы с поставщиком, производителем и ответственным партнером в одном лице.

Masa GmbH  
Masa-Str. 2  
56626 Andernach  
Germany  
Phone +49 2632 9292 0  
Service Hotline +49 2632 9292 88

Masa GmbH  
Werk Porta Westfalica  
Osterkamp 2  
32457 Porta Westfalica  
Germany  
Phone +49 5731 680 0

Маза-Москва  
Ср. Тишинский пер., 28, офис 220  
123557 РФ, Москва  
Тел. +7 495 23251 27  
Факс +7 495 23251 28  
info@masa.ru

info@masa-group.com  
service@masa-group.com  
www.masa-group.com

Masa - made in Germany.





## Лучший способ создания интерьеров во влажных и мокрых помещениях

Репутация на рынке ремонтно-строительных работ зарабатывается годами, а теряется быстро. Именно поэтому при реализации очередного проекта, будь то реконструкция уже существующего объекта или создание чего-то принципиально нового, важно не только выполнить заказ качественно и в срок, но и гарантировать, что использованные материалы

через несколько лет не придут в негодность. С влагостойкими системами на базе цементных плит АКВАПАНЕЛЬ® решение данной задачи больше не представляет сложности – разработанная компанией КНАУФ технология обеспечит надежную защиту конструкций на многие годы вперед даже при применении в помещениях с влажным режимом эксплуатации.

*Облицовки. Влагостойкие решения КНАУФ с АКВАПАНЕЛЬ® Внутренняя*

*Перегородки. Влагостойкие решения КНАУФ с АКВАПАНЕЛЬ® Внутренняя*



**Рис. 1.** Однослойная облицовка из плит АКВАПАНЕЛЬ® Внутренняя на металлическом каркасе, отнесенном от базовой стены



**Рис. 2.** Перегородка с однослойными обшивками из плиты АКВАПАНЕЛЬ® Внутренняя на двойном металлическом каркасе

В основе влагостойких решений КНАУФ – АКВАПАНЕЛЬ® Цементная плита Внутренняя, образующая надежное и прочное основание под финишную отделку в таких помещениях, как ванные комнаты, душевые, сауны, бассейны, санузлы, цеха пищевого производства, прачечные и другие зоны, где предполагается интенсивное воздействие влаги на строительные конструкции. Материал представляет собой плоские плиты из мелкозернистого бетона и минерального наполнителя (перлит). Все плоскости изделий, за исключением торцевых кромок, армированы щелочестойкой стекловолоконистой сеткой. Плиты производятся из натуральных природных компонентов и не содержат в своем составе вредных примесей, опасных для здоровья.



Рис. 3. АКВАПАНЕЛЬ® Цементная плита Внутренняя

Ключевым свойством плит АКВАПАНЕЛЬ® является абсолютная влагостойкость и устойчивость к возникновению плесени и грибка. Изделие не разбухает и не крошится от влаги, причем неизменность его формы, размеров и эксплуатационных свойств сохраняется даже в помещениях с плохой вентиляцией, где высокий уровень влажности наблюдается на протяжении всего дня. Плиты не нуждаются в дополнительной гидроизоляции. Материал прекрасно зарекомендовал себя даже при применении в общественных банях и хамамах при температуре до 70°C.

Небольшая толщина (12,5 мм) и сравнительно небольшая масса плит (порядка 15 кг/м<sup>2</sup>) позволяют осуществлять отделку помещения силами ремонтной бригады, состоящей всего из двух человек. Немаловажно, что мастерам нет необходимости осваивать навыки работы с новым материалом, – технология монтажа плит схожа с процессом монтажа гипсокартона, при этом прочность и жесткость готовых конструкций получается даже выше. Экспериментально установлено, что один слой обшивки выдерживает нагрузку до 50 кг/м<sup>2</sup>, а максимальная масса для облицовки может достигать до 120 кг при применении специальных решений. Таким образом, на конструкции, выполненные из плит АКВАПАНЕЛЬ®, можно навешивать

бытовую технику, сантехническое оборудование и тяжелые элементы декора.

Помимо устройства облицовок и перегородок, конструкции на базе цементных плит АКВАПАНЕЛЬ® Внутренняя оптимально подходят для создания криволинейных поверхностей. Стеклосетка в составе плит позволяет изгибать их с радиусом до 1 м в сухом виде, без дополнительного увлажнения и применения специальных инструментов. Это позволяет подрядчикам выполнять любые нестандартные заказы, предполагающие наличие сложных, волнообразных форм, арок и куполов. Комбинации из плоских и изогнутых модулей, конструкции выпуклой или вогнутой формы, различные порталы, вставки-светильники и вставки – вентиляционные блоки – плиты АКВАПАНЕЛЬ® позволяют воплотить в жизнь любую из вышеперечисленных задумок в кратчайшие сроки и с минимальными трудозатратами.

Даже в случаях, когда декор подразумевает сложную геометрию конструкций, смонтированные в соответствии с инструкцией производителя цементные плиты АКВАПАНЕЛЬ® образуют бесшовную поверхность, на которую можно наносить практически любую чистовую отделку – влагостойкие обои, мозаику, клинкер, плитку, декоративную штукатурку, краску, при этом однородная структура поверхности и отсутствие видимых стыков не только позитивно сказываются на эстетической привлекательности помещения, но и позволяют обходиться минимумом отделочных материалов и тем самым снижать итоговую стоимость проекта.



Цементную плиту АКВАПАНЕЛЬ® Внутренняя и комплектующие можно приобрести у дилерских организаций компании КНАУФ, полный список которых представлен на сайте [www.aquapanel.ru](http://www.aquapanel.ru) в разделе «Где купить?».

А специалисты КНАУФ проконсультируют не только по телефону или в офисе компании, но и проведут бесплатные выездные консультации и демонстрации на объектах. Кроме того, все желающие смогут пройти обучение в учебных центрах компании КНАУФ по применению и монтажу систем с продуктом Цементная плита АКВАПАНЕЛЬ® Внутренняя.

**KNAUF**

ООО «КНАУФ ГИПС»

Бесплатный телефон по России: 8-800-770-76-67

**AQUAPANEL®**

[www.aquapanel.ru](http://www.aquapanel.ru)

УДК 693.1:691.42.001.5

В.Н. ДЕРКАЧ, канд. техн. наук (v-derkatch@yandex.ru), О.Г. ДЕМЧУК, инженер

Филиал Республиканского унитарного предприятия «Институт БелНИИС» Научно-технический центр (Республика Беларусь, 224023, г. Брест, ул. Московская, 267/2)

## Несущая способность при сжатии каменных стен из крупноформатных силикатных блоков

Приведены результаты экспериментальных исследований при сжатии образцов каменной кладки, выполненных из силикатных пазогребневых блоков на тонкослойных растворных швах. На основании экспериментальных исследований выявлены особенности деформирования и разрушения кладок, получены значения прочности каменной кладки при сжатии и ее деформационных характеристик. На основании численных исследований выявлено влияние технологии выполнения растворных швов на прочностные показатели кладки. Показаны особенности работы при сжатии несущих каменных стен из крупноформатных силикатных блоков. Приведены результаты численных исследований узла сопряжения стена – многопустотное перекрытие, установлены значения коэффициентов податливости указанного узла в зависимости от уровня сжимающих напряжений в стене. Даны предложения по расчету несущих стен из крупноформатных пазогребневых силикатных блоков на тонкослойных швах.

**Ключевые слова:** каменная кладка, силикатные блоки, тонкослойные растворные швы, прочность при сжатии, модуль деформаций, несущие стены.

V.N. DERKACH, Candidate of Sciences (Engineering) (v-derkatch@yandex.ru), O.G. DEMCHUK, Engineer  
Branch office of the RUE «Institute BelNIIS» – Scientific-Technical Center (Republic of Belarus, 224023, Brest, Moskovskaya str., 267/2)

### Bearing Capacity of Masonry Walls Made of Large-Size Silicate Blocks under Compression

The results of experimental studies of samples of block masonry made of silicate tongue-and-groove blocks with thin mortar seams under compression are presented. On the basis of experimental studies, features of the deformation and destruction of masonries have been revealed; values of the strength of the block masonry under compression and its deformation characteristics have been obtained. On the basis of numerical studies, the influence of technology of mortar seams execution on the strength characteristics of the masonry has been revealed. Features of the operation of bearing masonry walls made of large-size silicate blocks under compression are shown. The results of numerical studies of the wall to hollow-core overlap node are presented; the values of compliance coefficients of this node depending on the level of compressing deformations in the wall have been established. Proposals for calculation of bearing walls made of large-size tongue-and-groove silicate blocks with thin layer seams are presented.

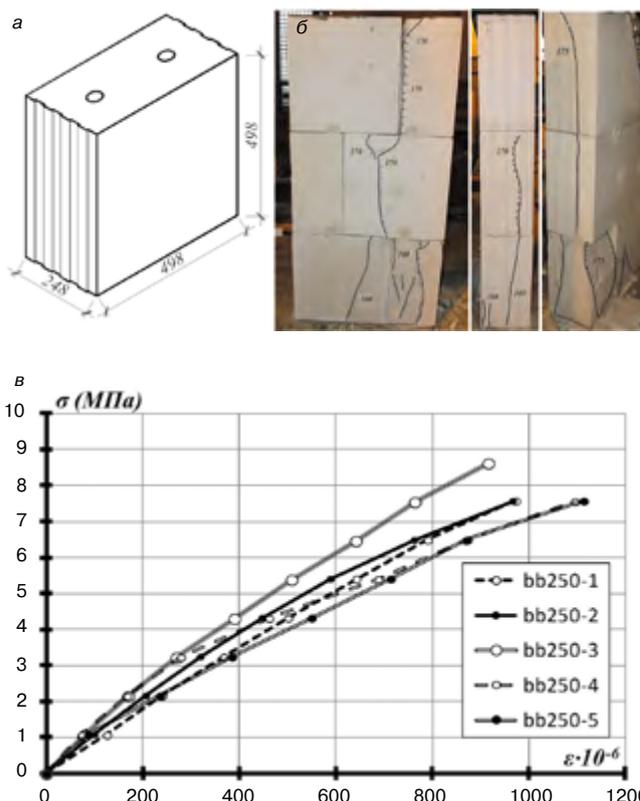
**Keywords:** block masonry, silicate blocks, thin layer mortar seams, strength under compression, modulus of deformation, bearing walls.

Силикатные кладочные изделия более 100 лет используются для возведения каменных кладок. Традиционно производимыми силикатными кладочными изделиями на территории стран СНГ являлись кирпич и камни. Кладки, как правило, выполнялись на стандартных растворных швах, а силикатные кладочные изделия обычно применялись в наружных стенах в качестве облицовочного материала или во внутренних несущих стенах.

В практике современного домостроения активно внедряются новые технологии производства кладочных работ, основанные на применении крупноформатных силикатных кладочных изделий на тонкослойных растворных швах с пазогребневым соединением вертикальных швов. Возведение указанных кладок производится с применением специальных грузоподъемных механизмов – мини-кранов. Благодаря высокой прочности таких кладок несущие стены многоэтажных зданий можно возводить толщиной 250 мм. При этом экономятся материалы, до 7% увеличивается полезная площадь помещений, а скорость возведения здания возрастает примерно в два раза [1].

Однако работа при сжатии кладок из крупноформатных силикатных блоков на клеевых швах имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при проектировании несущих стен.

В горизонтальных тонкослойных швах кладки, выполненной с применением клеевого раствора, в отличие от кладок со стандартными растворными швами отсутствует выраженный эффект трехосного сжатия. При одинаковой прочности кладочных изделий кладки на тонкослойных клеевых швах имеют более высокие прочностные показатели при сжатии и значительно меньшую деформативность. В этом смысле данные кладки можно



**Рис. 1.** Результаты испытаний при сжатии каменной кладки: а – форма кладочного изделия; б – характер трещинообразования и разрушения; в – диаграммы деформирования опытных образцов

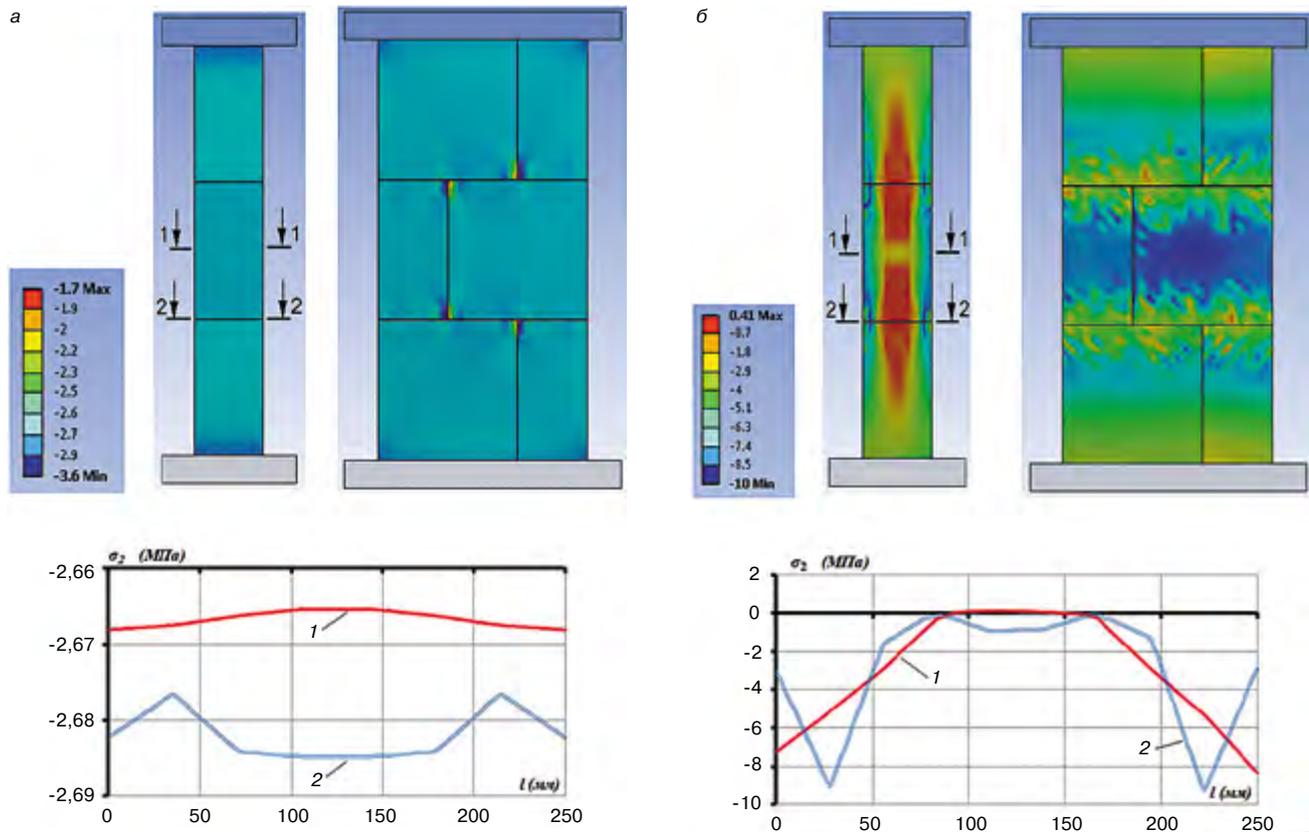


Рис. 2. Характер распределения главных сжимающих напряжений в каменной кладке в зависимости от вида растворных швов: 1 – по сечению 1–1; 2 – по сечению 2–2; а – с полным заполнением раствором горизонтальных швов; б – с заполнением горизонтальных швов двумя полосками раствора шириной 40 мм

рассматривать как некий однородный (гомогенный) материал. При этом степень однородности кладки возрастает с увеличением высоты кладочного изделия. Обладая более высокой однородностью по сравнению с кладками на обычных растворных швах, кладки из крупноформатных изделий на тонкослойных швах являются более хрупкими и, как следствие, более чувствительными к различного рода вынужденным деформациям.

Несущая способность каменных стен определяется прочностными показателями каменной кладки. Для каменных кладок из крупноформатных силикатных блоков на тонкослойных клеевых швах в действующих на территории РФ нормативных документах данные показатели отсутствуют. Комплексные испытания таких кладок были проведены в 2015 г. в филиале РУП «БелНИИС»-НТЦ [2].

На рис. 1. приведены результаты испытаний при сжатии серии опытных образцов кладки, выполненных из крупноформатных силикатных блоков размерами 498×498×248 мм по ГОСТ 379–2015 «Кирпич, камни, блоки и плиты перегородочные силикатные. Общие технические условия», выпускаемых ОАО «Ярославский завод силикатного кирпича». По пределу прочности при сжатии силикатные блоки соответствовали М200. Для приготовления кладочных растворов использовалась сухая клеевая растворная смесь по ГОСТ 31357–2007 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия».

Испытания показали, что при действии сжимающей нагрузки на образцы кладки первые трещины возникали в средней по высоте части опытных образцов или в блоках, контактирующих с плитами пресса. Величина

Таблица 1

Результаты определения прочностных и деформационных характеристик кладки при сжатии

Серия	№ образца	Предел прочности каменной кладки при сжатии $R_u$ , МПа		Начальный модуль упругости при сжатии $E_0$ , МПа		Секущий модуль упругости при сжатии $E$ , МПа	
		одного образца $R_{u,i}$	среднее значение по серии $R_{u,m}$	одного образца $E_{0,i}$	среднее значение по серии $E_{0,m}$	одного образца $E_i$	среднее значение по серии $E_m$
bb250	1	9	10,1 (8,4*)	8600	12000	8800	10000
	2	10,7		10800		10000	
	3	10,9		13600		11600	
	4	9,9		14600		11400	
	5	10,2		12400		8300	
Коэффициент вариации, %		7,3		19,8		14,9	

Примечание. \* обозначено нормативное значение прочности при сжатии  $R_k$ .

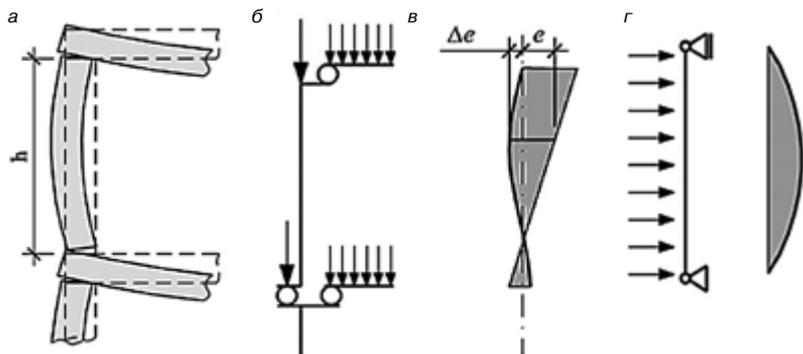


Рис. 3. Схема шарнирно опертой несущей стены: а – схема изгиба стены и перекрытий; б – расчетная схема стены; в – эксцентриситет приложения вертикального усилия; г – эпюра изгибающих моментов от горизонтальной нагрузки [5]

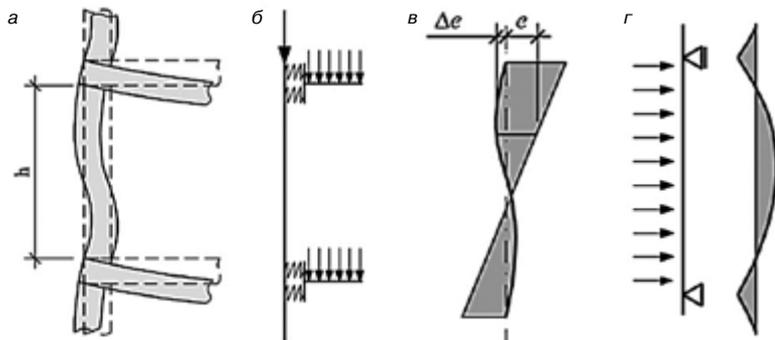


Рис. 4. Схема несущей стены как элемента рамы: а – схема изгиба стены и перекрытий; б – расчетная схема стены; в – эксцентриситет приложения вертикального усилия; г – эпюра изгибающих моментов от горизонтальной нагрузки [5]

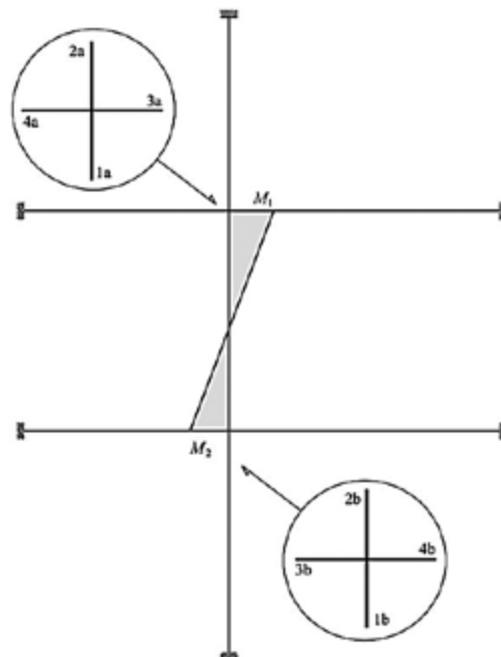


Рис. 5. Эпюра изгибающих моментов в стене, вызванных внецентренным приложением нагрузки от перекрытий согласно [7]

нагрузок трещинообразования  $F_{срс}$  составляла 0,7–0,9 от разрушающей нагрузки  $F_{max}$ . Увеличение нагрузки приводило к развитию трещин в вертикальном направлении по швам кладки и по телу силикатных блоков и образованию новых трещин, разделяющих массив кладки на отдельные вертикальные фрагменты. Разрушение опытных образцов носило хрупкий характер и начиналось с выколов материала блоков в местах пересечения горизонтальных и вертикальных швов, а также образования на торцевых гранях вертикальных трещин, разрывающих кладку в поперечном направлении.

Числовые значения прочностных и деформационных характеристик каменной кладки, полученные по результатам испытаний пяти опытных образцов, приведены в табл. 1.

Приведенные в табл. 1 значения прочностных и деформационных характеристик получены при полном заполнении раствором горизонтальных швов кладки.

В случае полосовых горизонтальных растворяющих швов передача сжимающих напряжений на последующие слои кладки осуществляется через параллельные полосы клеевого раствора, что приводит к возникновению локальных зон концентрации напряжений и негативно отражается на прочности каменной кладки [3, 4].

На рис. 2. приведены результаты численного моделирования испытаний образцов каменных кладок из крупноформатных блоков на клеевых швах при действии сжимающего усилия  $F=500$  кН перпендикулярно плоскости горизонтальных растворяющих швов. Рассмотрено два варианта каменных кладок:

- с полным заполнением горизонтальных швов (рис. 2, а);
- с заполнением горизонтальных швов двумя полосками раствора шириной 40 мм (рис. 2, б).

Из рис. 2 следует, что в случае полосовых растворяющих швов имеет место резко выраженная неравномерность распределения главных напряжений по толщине

кладки. При этом максимальные значения главных растягивающих напряжений  $\sigma_1$  и главных сжимающих напряжений  $\sigma_2$  в силикатных блоках соответственно в 5 раз и 3 раза выше, чем при сплошном заполнении раствором горизонтальных швов.

Данные выводы определяют необходимость проведения целенаправленных экспериментальных исследований прочностных и деформационных характеристик каменных кладок из крупноформатных силикатных блоков с учетом технологических особенностей их возведения.

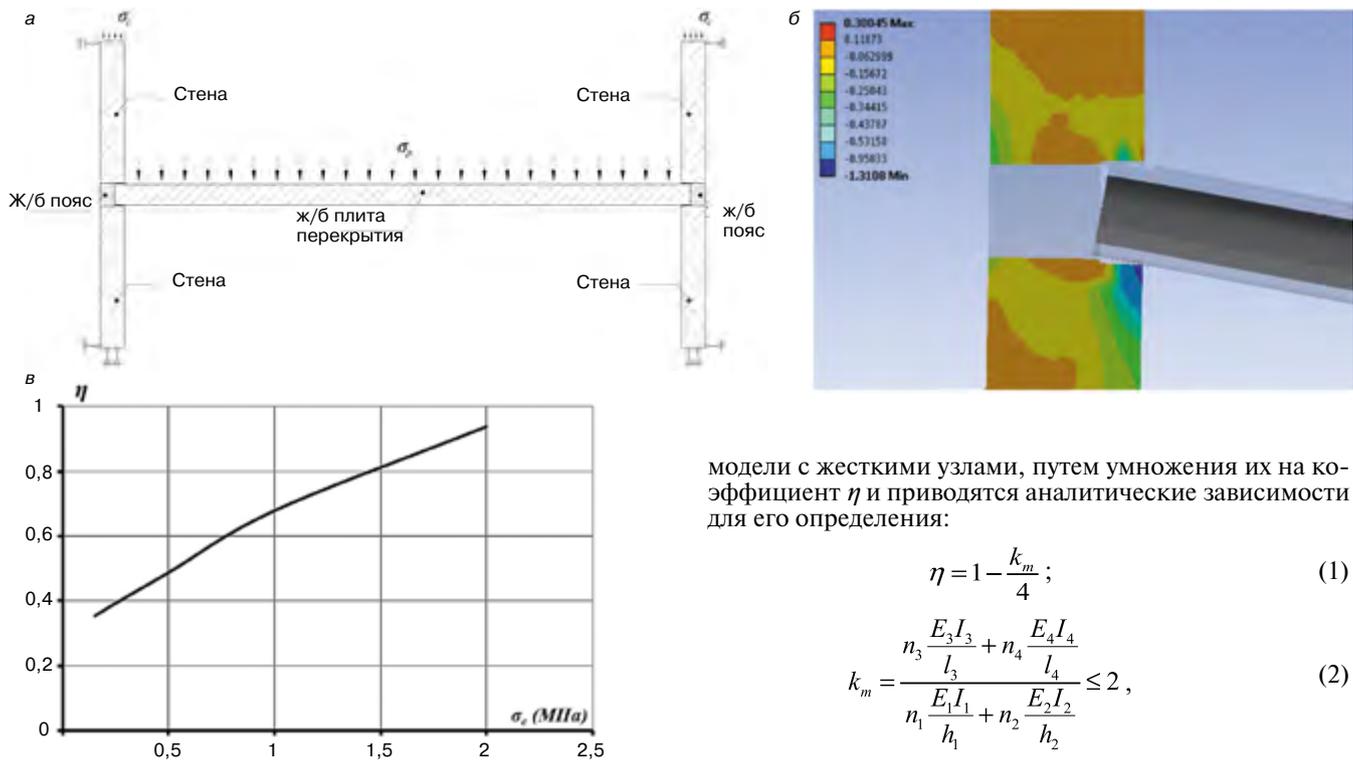
Механизмы разрушения внецентренно сжатых каменных стен главным образом зависят от их гибкости и величины эксцентриситета приложения нагрузки. На величину эксцентриситета существенное влияние оказывает способ сопряжения стены с перекрытием и величина сжимающих напряжений, действующих по контакту стены с перекрытием.

В зависимости от величины сжимающих напряжений можно рассматривать две схемы работы несущей стены.

При небольших значениях сжимающих напряжений, которые характерны для стен малоэтажных зданий или стен верхних этажей, расчетная схема стены представляет собой гибкий внецентренно сжатый стержень с шарнирными опорами (рис. 3). Исчерпание несущей способности стены в данном случае наступает в результате нарастания начального эксцентриситета вследствие изгиба стены под воздействием вертикального усилия (эффекты второго рода), а также нагрузки, приложенной перпендикулярно плоскости стены.

Расчетная модель, приведенная на рис. 3, была предложена Л.И. Онищиком [6] и реализована в СНиП II-22–81 и СП 15.13330–2012.

Опирание междуэтажных перекрытий на гибкие несущие стены, выполненные из крупноформатных силикатных изделий, производится либо на всю толщину



**Рис. 6.** Моделирование сопряжения плиты с каменной кладкой: а – расчетная схема модели; б – характер деформаций в узле сопряжения плиты со стеной и распределение главных сжимающих напряжений в стене; в – график зависимости « $\eta$ – $\sigma_w$ »

стены (в случае монолитных или сборно-монолитных перекрытий), либо на половину толщины стены при применении многопустотных плит перекрытий. При этом анкеровка многопустотных плит перекрытий осуществляется в монолитных железобетонных поясах, которые устраиваются в уровне каждого перекрытия или непосредственно под ним. Данные пояса объединяют продольные и поперечные стены здания и выполняют функции связующих элементов, предотвращающих прогрессирующее разрушение здания при особых воздействиях.

В этом случае на несущие стены в узлах их сопряжения с перекрытиями передаются сжимающие усилия и изгибающие моменты, возникающие в плитах перекрытий. Стена при этом может моделироваться вертикальным стержневым элементом рамы с упругоподатливыми узлами (рис. 4). При горизонтальных воздействиях стена рассматривается как многопролетная неразрезная балка.

Проверка предельного состояния несущей способности стены производится в трех сечениях по высоте: в верхнем, нижнем и среднем.

На базе рамной модели расчет внецентренно сжатых стен производится в Еврокоде 6 [7]. При этом допускается принимать линейную эпюру распределения изгибающих моментов по высоте стены, а значения изгибающих моментов в стержнях, сходящихся в узле, распределять пропорционально изгибной жесткости стен и перекрытий (рис. 5). Определение изгибающих моментов в элементах рамы производится методом конечных элементов или на основании аналитических зависимостей, приведенных в приложении С к Еврокоду 6 из предположения жесткого сопряжения стержней в узлах.

В действительности сопряжение перекрытий со стенами не является жестким, а обладает определенной податливостью, которая характеризуется коэффициентом податливости  $\eta$ .

В [7] допускается уменьшать значения узловых изгибающих моментов, полученных на основании рамной

модели с жесткими узлами, путем умножения их на коэффициент  $\eta$  и приводятся аналитические зависимости для его определения:

$$\eta = 1 - \frac{k_m}{4}; \quad (1)$$

$$k_m = \frac{n_3 \frac{E_3 I_3}{l_3} + n_4 \frac{E_4 I_4}{l_4}}{n_1 \frac{E_1 I_1}{h_1} + n_2 \frac{E_2 I_2}{h_2}} \leq 2, \quad (2)$$

где  $n_i$  — коэффициент жесткости стержня; он равен четырем в случае жесткого закрепления стержней в обоих узлах и трем в остальных случаях;  $E_i$  — модуль упругости стержня  $i$  при  $i = 1, 2, 3$  или  $4$  (рис. 5);  $I_i$  — момент инерции стержня  $i$ , при  $i = 1, 2, 3$  или  $4$ ;  $h_1$  — высота в свету стержня  $1$ ;  $h_2$  — высота в свету стержня  $2$ ;  $l_3$  — пролет в свету стержня  $3$ ;  $l_4$  — пролет в свету стержня  $4$ .

Зависимости (1) и (2) базируются на экспериментальных исследованиях [8] и предполагают опирание перекрытия по всей толщине стены. Следует отметить, что данные зависимости не учитывают уровня обжатия каменной кладки, который может увеличивать значение коэффициента податливости.

С целью оценки влияния сжимающих напряжений в стене  $\sigma_w$  на значения коэффициента податливости  $\eta$  были выполнены численные исследования работы узла сопряжения плиты пустотного настила пролетом 6 м со стеной, кладка которой выполнена из силикатных крупноформатных пазогребневых блоков толщиной 249 мм на тонкослойных клеевых швах. Деформационные характеристики каменной кладки принимались по результатам экспериментальных исследований. Плита перекрытия опиралась на каменную кладку через слой цементно-песчаного раствора толщиной 15 мм, глубина опирания плиты составляет 100 мм. Сопряжение плиты перекрытия с монолитной железобетонной обвязкой, выполняемой по контуру стен, не учитывалось. Нагружение плиты осуществлялось равномерно распределенной нагрузкой 5 кН/м<sup>2</sup>. В расчетах варьировалась величина сжимающих напряжений, действующих перпендикулярно горизонтальным швам кладки в диапазоне 0,1–2 МПа. В ходе численного эксперимента в среде вычислительного комплекса ANSYS решались нелинейные контактные задачи с учетом трения между плитой перекрытия и каменной кладкой.

Анализируемая расчетная модель и результаты расчета приведены на рис. 6.

На основании численного анализа установлено, что при глубине опирания плиты перекрытия на стену из силикатных блоков 100 мм происходит частичное защемление плиты и изгибающие моменты, возникающие в ней, передаются на стены здания. При этом уро-

вень сжимающих напряжений в стене существенно влияет на значение коэффициента податливости. Это свидетельствует о целесообразности применения рамной модели при оценке несущей способности стен многоэтажных зданий, кладка которых выполнена из крупноформатных силикатных блоков. Сопоставительные расчеты показывают, что установленные с применением рамной модели значения изгибающих моментов в несущих стенах, а следовательно, и расчетные значения эксцентриситетов в зависимости от этажности здания и пролетов перекрытий могут в несколько раз превышать аналогичные значения, полученные с применением расчетной модели несущих стен, используемой в СП 15.13330–2012.

**Список литературы / References**

1. Kalksandstein. Planungshandbuch. Planung, Konstruktion, Ausführung. Hannover: Bundesverband Kalksteinindustrie. 2014. 368 p.  
2. Деркач В.Н., Найчук А.Я. Экспериментальные исследования прочности каменной кладки из пазогребневых силикатных блоков // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 6. С. 77–82.

2. Derkach V.N., Naichuk A.Ya Pilot studies of durability of a stone laying from tongue-and-groove silicate blocks. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016. No. 6, pp. 77–82. (In Russian).  
3. Mojsilovi N.A. Discussion of masonry characteristics derived from compression tests. *Proceedings of the 10th Canadian Masonry Symposium, Banff, Alberta, Canada. June 8–12, 2005. Calgary: University of Calgary, Department of Civil Engineering. 2005. pp. 242–250.*  
4. Schubert P. Strength properties of masonry. *Proc. of the 11th Int. Brick/Block Masonry Conf. Shanghai: Tongji University. 1997. Vol. 1. pp. 191–202.*  
5. Drobiec L., Jasinski R., Piekarczyk. *Konstrukcje Murowe wedlug Eurokodu 6 i norm zwiazanych. Warszawa: Wydawnictwo naukowe PWN. 2013. 692 p.*  
6. Онищик Л.И. Каменные конструкции. М.: Стройиздат. 1939. 208 с.  
6. Onishchik L.I. *Kamennye konstruktсии [Stone designs]. Moscow: Stroizdat. 1939. 208 p.*  
7. Eurocode 6: *Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten. Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk: EN 1996-1-1:2005. Berlin: Deutsches Institut für Normung. 2005. 127 p.*  
8. Hendry A.W. *Structural masonry. London: MacMillan Education Ltd. 1990. 289 p.*

**IX Международная конференция**

**НАНОТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ  
NTC-2017**

**17–21 марта 2017 г.**

**Шарм-эль-Шейх, Египет**

**Организаторы конференции**

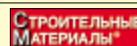
Национальный исследовательский центр жилья и строительства (HBRC)  
Египетско-российский университет (ERU)  
Ижевский государственный технический университет  
им. М.Т. Калашникова  
Египетский союз инженеров



**Тематика конференции**

- Нанокompозиты в строительных материалах
- Производство лакокрасочных материалов с нанодобавками
- Нанотехнологии в строительстве
- Нанотехнологии стекол и керамики
- Защита от пожара с помощью наночастиц
- Нанотехнологии для энергоэффективности в зданиях
- Нанотехнологии в кондиционировании воздуха
- Моделирование нанокompозитов
- Наноструктурирующие материалы в архитектуре
- Модификация минеральных вяжущих наносистемами

Информационная поддержка – журнал «Строительные материалы»®



Сайт конференции: [http://inter.istu.ru/russian/nano\\_r.html](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.: 8-9128566688. 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



## Оборудование для силикатной промышленности:

- Гидравлические прессы
- Смесители и реакторы
- Запарочные вагонетки
- Электродвигательные мосты
- Автоклавы
- Парогенераторы
- Линии упаковки
- Модернизация производства
- Быстроизнашивающиеся пластины и запчасти

Повышайте **производительность** и **качество продукции** с  
WKB Systems GmbH!



## Компания КНАУФ вывела на российский рынок новый уникальный продукт

*В России началось производство гипсокартонного листа КНАУФ «Сапфир», объединяющего в себе все лучшие свойства влагостойкого и огнестойкого гипсокартона, обладающего высокой плотностью сердечника, а следовательно, лучшими звукоизоляционными характеристиками, большей ударпрочностью и способностью выдерживать большие нагрузки при навешивании тяжелых предметов.*

Приказом от 5 мая 2014 г. Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии введен в действие новый межгосударственный стандарт ГОСТ 32614–2012 «Плиты гипсовые строительные. Технические условия», в соответствии с которым с 1 января 2015 г. должен производиться данный вид продукции на всех заводах Российской Федерации [1]. Основные изменения в новом стандарте коснулись номенклатуры продукции и условных обозначений.

### Соответствие номенклатуры продукции старого и нового стандартов

ГОСТ 6266–97 «Листы гипсокартонные»		ГОСТ 32614–2012 (EN 520:2009, MOD)	
Старое наименование	Условное обозначение	Новое наименование	Условное обозначение
Лист гипсокартонный обычный	ГКЛ	Гипсовая строительная плита	ГСП-А
Лист гипсокартонный влагостойкий	ГКЛВ	Гипсовая строительная плита влагостойкая	ГСП-Н2
Лист гипсокартонный с повышенной сопротивляемостью воздействию открытого пламени	ГКЛО	Гипсовая строительная плита заданной плотности с повышенной стойкостью гипсового сердечника при воздействии открытого пламени	ГСП-DF
Лист гипсокартонный влагостойкий с повышенной сопротивляемостью воздействию открытого пламени	ГКЛВО	Гипсовая строительная плита влагостойкая заданной плотности с повышенной стойкостью гипсового сердечника при воздействии открытого пламени	ГСП-DFН2

### Преимущества КНАУФ-лист «Сапфир»

Специалисты компании КНАУФ, руководствуясь требованиями ГОСТ 32614–2012, разработали абсолютно новый вид продукта, который нельзя было произвести по ГОСТ 6266–97, – КНАУФ-лист «Сапфир». Кодировка по новому ГОСТ DFH3IR означает, что лист одновременно обладает такими свойствами, как высокая плотность, огнестойкость, влагостойкость, повышенная твердость поверхности, повышенная прочность листа [1].

Высокая плотность сердечника положительно сказывается на звукоизоляционных свойствах конструкций, что доказано испытаниями: «Сапфир» увеличивает

индекс изоляции воздушного шума в сравнении с обычным гипсокартонным листом на 2–47 дБ. Это различие достаточно ощутимо для человеческого уха.

Хочется отметить, что уникальный состав сердечника был разработан непосредственно российскими специалистами Департамента по технике и производству КНАУФ.

Огнестойкость листа защищает помещения и людей в них, увеличивает время, необходимое для эвакуации и тушения пожара, предел огнестойкости такого листа выше на 15–30 мин.

Влагостойкость листа позволяет возводить конструкции в помещениях с повышенной влажностью – кухнях, ваннах, туалетных комнатах и т. п.



## Свойства и области применения продукции КНАУФ

Свойства	Области применения	ГКЛ	ГКЛВ	Сапфир	ГВЛВ	ГКЛО
Влагостойкость	Кухни, ванные, санузлы		+	+	+	
Звукоизоляция	Спальни, детские, переговорные			+	+	
Высокая прочность, огнестойкость	Для больших нагрузок и защиты от пожара			+	+	+
Ударостойкость	Коридоры, детские, мансарды			+	+	
Высокое качество поверхности	Под покраску и дорогие обои в один слой шпаклевки			+		

**Примечание.** Зеленая рамка – листы, применяемые «частниками»; красная рамка – листы, применяемые профессиональными бригадами.



Поверхностная твердость листа «Сапфир» на 50% выше, чем у обычного гипсокартонного листа, что означает более долгий межремонтный срок.

Повышенная прочность листа обеспечивает большой запас прочности конструкций и возможность навешивания тяжелых предметов.

Отличительной чертой листа «Сапфир» является его светло-синий цвет, который выделяется в цветовой гамме типовых продуктов. Эта особенность обозначена использованием картона, экспортируемого из Германии. Он более гладкий и прочный, чем отечественные аналоги, позволяет добиться более качественной финишной отделки, и благодаря его использованию лист можно отнести к классу пожарной опасности КМ1.

#### Список литературы

1. Новый ГОСТ гипсокартона КНАУФ // *Строительные материалы*. 2015. № 3. С. 20–21.

#### Целевая аудитория

Целью разработки нового гипсокартонного листа явилось желание вывести на российский рынок отделочных материалов лист премиального уровня, не имеющих конкурентов по совокупным характеристикам.

Он может быть востребован двумя основными типами потребителей: непосредственно заказчиками с высокими требованиями к качеству, которые самостоятельно выбирают материалы для своего ремонта в доме или квартире; руководителями ремонтных бригад, которые имеют высокий авторитет и работают только с лучшими материалами, влияя на решения заказчика – коммерческие объекты высокого класса (офисы, гостиницы, частные поликлиники и т. п.).

#### References

1. New GOST of Gypsum Plasterboard KNAUF. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 3, pp. 20–21. (In Russian).

А.Н. ВОЛОДЧЕНКО, канд. техн. наук, В.С. ЛЕСОВИК, член-корр. РААСН, д-р техн. наук  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

## Перспективы расширения номенклатуры силикатных материалов автоклавного твердения

Установлена возможность расширения традиционной сырьевой базы автоклавных силикатных материалов за счет глинистых пород незавершенной стадии минералообразования, которые широко распространены в Российской Федерации и во многих странах мира, а также в больших количествах попадают в зону горных работ при добыче полезных ископаемых. Использование таких пород позволит управлять процессами структурообразования автоклавных материалов нового поколения. При этом синтезируются новообразования различного состава и морфологии, формирующие цементирующие соединения оптимальной структуры, что обеспечивает высокие физико-механические свойства изделий. Предложена номенклатура эффективной автоклавной продукции, в том числе стеновые, отделочные, конструкционно-теплоизоляционные, теплоизоляционные и акустические.

**Ключевые слова:** глинистые породы, сырьевая база, автоклавные силикатные материалы.

A.N. VOLODCHENKO, Candidate of Sciences (Engineering),  
V.S. LESOVIK, Doctor of Sciences (Engineering), Corresponding Member of Russian Academy of Architecture and Building Sciences  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, 308012 Belgorod, Russian Federation)

### Perspectives of Expanding Nomenclature of Silicate Materials of Autoclave Hardening

The possibility to expand the traditional raw material base of autoclave silicate materials due to clay rocks of unfinished stage of mineralization, which are widespread in the Russian Federation and in many countries of the world as well as in large quantities get in the zone of mining operations when extracting minerals, has been established. The use of these rocks makes it possible to control the processes of structure formation of autoclave materials of a new generation. In this case, new formations of different compositions and morphology, which form cementing compounds of optimal composition that ensures high physical-mechanical properties of products, are synthesized. The nomenclature of efficient autoclave products including wall, finishing, structural-heat insulating, heat insulating, and acoustic materials is proposed.

**Keywords:** clay rocks, raw base, autoclave silicate materials.

Важнейшей задачей современного строительства является создание для человека благоприятной и комфортной среды обитания, которая определяется параметрами микроклимата, уровнем шума, освещенности и т. д. Большое значение приобретает экологическая безопасность строительных материалов, так как городской житель, проживая большую часть времени внутри помещений, зачастую подвергается действию загрязняющих веществ больше, чем в наружном воздухе. В связи с этим необходима новая парадигма проектирования и производства эффективных строительных композитов, обеспечивающая комфортные условия проживания, работоспособность и здоровье человека.

Одними из наиболее экономичных и распространенных стеновых композитов являются автоклавные силикатные материалы, для производства которых по традиционной технологии используются известь и песок. Следует отметить, что запасы песка, удовлетворяющие нормативным требованиям, ежегодно истощаются. Кроме того, ухудшаются горно-геологические условия месторождений, прироста запасов практически нет. Учитывая большую долю затрат горного цеха на производство силикатных материалов, целесообразно использовать в качестве сырья различные побочные продукты и отходы промышленности [1–4].

Анализ сырьевой базы позволил теоретически обосновать и экспериментально подтвердить возможность использования вместо песка нетрадиционных для стройиндустрии глинистых пород незавершенной фазы минералообразования, отличительной особенностью которых является наличие термодинамически неустойчивых соединений, таких как несовершенной структуры гидрослюда, смешанослойные образования, рентгеноаморфные минералы, тонкодисперсный слабоокатанный кварц и в небольшом количестве  $\text{Ca}^{2+}$  монтмо-риллонит и каолинит (рис. 1).

К породам незавершенной фазы минералообразования относятся отложения коры выветривания магмати-

ческих и метаморфических пород, эолово-элювиально-делювиальные отложения, покровные суглинки и т. д. Подобные глинистые породы широко распространены как в Российской Федерации, так и в мире, а также в больших количествах попутно извлекаются при добыче рудных полезных ископаемых.

Использование таких пород позволяет управлять процессами структурообразования автоклавных материалов нового поколения. Полиминеральный состав пород и их термодинамическая неустойчивость обеспечивают фазообразование в условиях пониженного давления и сокращения времени автоклавной обработки. При этом возможен синтез нетипичных для традиционных известково-песчаных силикатных материалов новообразований, обуславливающих высокие физико-механические свойства изделий [5–8].

Теоретические предпосылки использования нетрадиционной сырьевой базы промышленности строительных материалов на основе глинистых пород незавершенной стадии минералообразования позволили предложить широкую номенклатуру автоклавных силикатных материалов нового поколения (рис. 2).

Эксплуатационные характеристики традиционных силикатных материалов обуславливаются фазообразованием в системе  $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  [9–12]. В результате гидротермального синтеза образуются гидросиликаты кальция различной основности, определяющие физико-механические свойства стеновых материалов, повысить которые можно за счет увеличения тонкости помола кремнеземистого компонента, повышения расхода извести, а также увеличения давления автоклавной обработки и его продолжительности. Однако такой путь приводит к существенному увеличению энергоемкости производства, что снижает эффективность использования силикатных материалов.

Спецификой предлагаемого сырья является его полиминеральный состав, который обеспечивает в си-

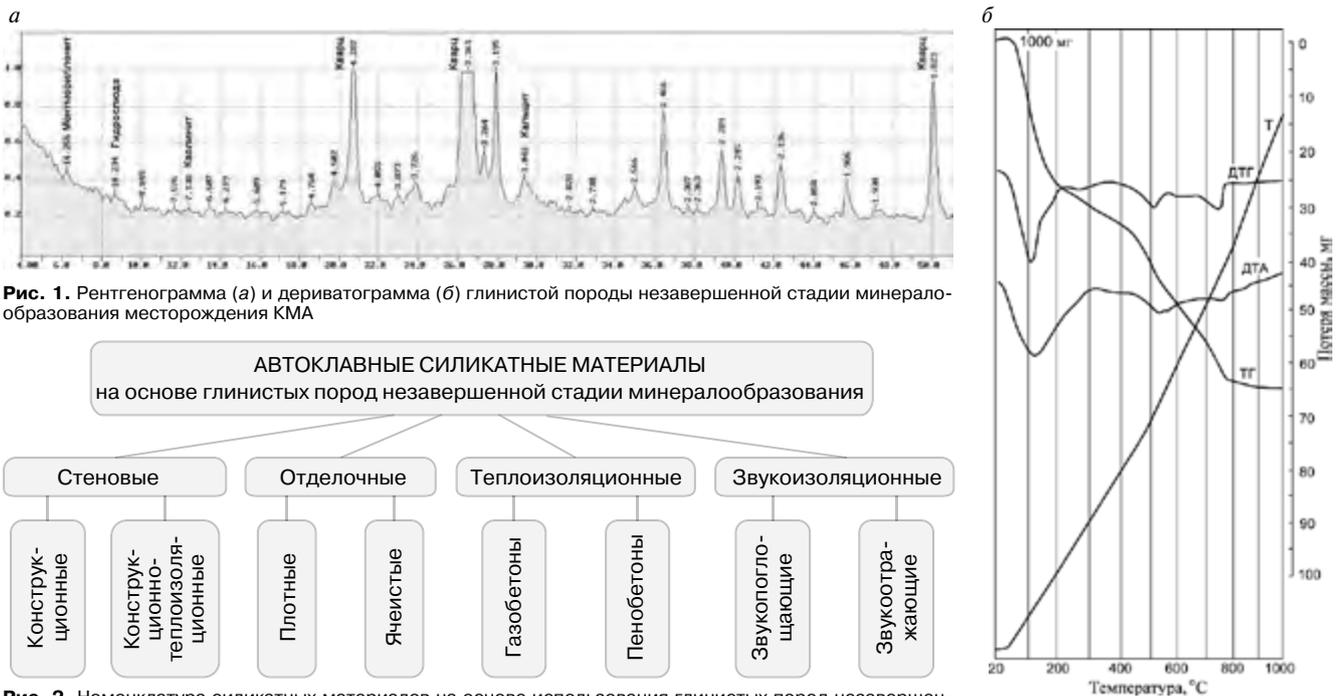


Рис. 1. Рентгенограмма (а) и дериватограмма (б) глинистой породы незавершенной стадии минералообразования месторождения КМА



Рис. 2. Номенклатура силикатных материалов на основе использования глинистых пород незавершенной стадии минералообразования

системе  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  синтез новообразований различного состава и морфологии, за счет чего формируется оптимальная микроструктура цементирующего соединения, определяющая высокие эксплуатационные показатели материалов нового поколения.

Установлено, что в изучаемой системе интенсифицируются процессы синтеза гидросиликатов кальция и их кристаллизация, а также образуются гидрогранаты различного состава и гидроферриты. В тоберморите происходит частичное замещение ионов  $\text{Si}^{4+}$  на  $\text{Al}^{3+}$ , что уплотняет его структуру. Кроме того, в многокомпо-

нентной системе синтез различных по составу новообразований растягивается во времени, что способствует снижению кристаллизационного давления в структуре материала и увеличению количества межкристаллических контактов, а также образованию крупнокристаллических фаз, которые являются микронаполнителем в субмикроструктурной гелевидной фазе из низкоосновных гидросиликатов.

Теоретические и экспериментальные исследования были апробированы на примере получения стеновых, отделочных, конструктивно-теплоизоляционных, теплоизоляционных и акустических материалов с ис-

Таблица 1

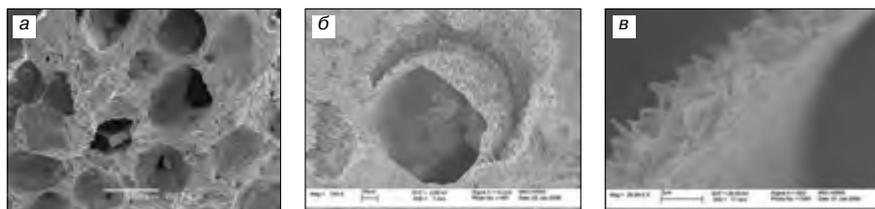
**Влияние времени изотермической выдержки на прочность силикатных материалов на основе песчано-глинистых пород КМА**

Активность сырьевой смеси, %	Предел прочности при сжатии (МПа) в зависимости от времени изотермической выдержки, ч				
	2	3	4	6	8
4	24,4	26,2	26,1	25,9	25,3
6	25,1	26,7	26,5	26,2	25,2
8	28,3	32	32,1	30,1	29,6

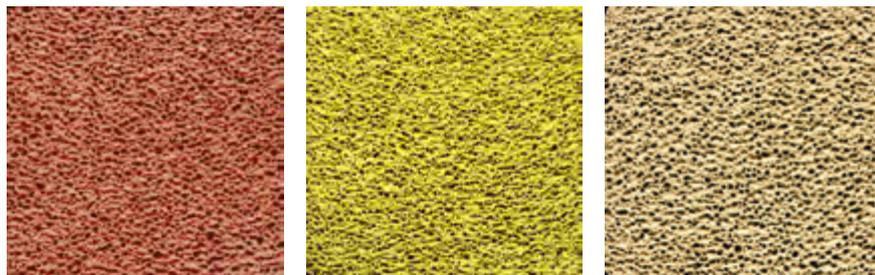
Таблица 2

**Свойства силикатных материалов на основе песчано-глинистых пород незавершенной стадии минералообразования**

Сырьевые ресурсы	Активность сырьевой смеси, %	Давление автоклавной обработки, МПа	Время изотермической выдержки, ч	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа	Водопоглощение, %	Морозостойкость, циклов
Традиционное известково-песчаное сырье	6-8	0,8-1	6-8	1800-1850	20-30	10-12	25-35
Вскрышные породы КМА	4-8	0,4-1	3-4	1850-2000	25-40	7-10	35-50
Глинистые породы АПП				1800-1950	30-45	8-11	35-50
Глинистые отходы обогащения песков Новгородской области				1850-2000	25-35	9-10	35-50
Суглинки Республики Йемен				1800-1900	30-45	10-13	35-50



**Рис. 3.** Макро- и микроструктура акустических материалов на основе глинистых пород незавершенной стадии минералообразования, РЭМ: а –  $\times 50$ ; б –  $\times 750$ ; в –  $\times 26000$



**Рис. 4.** Цветные декоративно-акустические материалы

пользованием вскрышных глинистых пород Курской магнитной аномалии (КМА), Архангельской алмазносной провинции (ААП), месторождений различных регионов Российской Федерации и ряда зарубежных государств.

Высокая реакционная способность сырья ускоряет синтез и формирование цементирующего соединения, что позволяет существенно сократить время гидротермальной обработки изделий, а также снизить давление в автоклаве. Формирование рациональной структуры цементирующего соединения, которая обеспечивает максимальную прочность силикатных материалов, происходит в течение 3 ч изотермической выдержки (табл. 1), что в два раза меньше, чем при производстве традиционных известково-песчаных силикатных материалов. При этом возможно сокращение расхода извести.

Энергоемкость производства сокращается не только за счет снижения параметров автоклавной обработки, но и при подготовке сырья. За счет высокой дисперсности глинистых пород на помол известково-глинистого вяжущего затрачивается меньше времени, чем на приготовление традиционного известково-песчаного вяжущего.

С использованием сырья различных месторождений по энергосберегающей технологии получены силикатные материалы с пределом прочности при сжатии до 40–45 МПа, что в 1,5–2 раза выше прочности традиционных силикатных материалов (табл. 2).

Высокая дисперсность глинистых пород позволяет повысить прочность сырья в 2–4 раза, что облегчит формирование высокопустотных стеновых силикатных материалов со средней плотностью 1000–1300 кг/м<sup>3</sup>. При этом объем используемого исходного сырья сокращается до 30–35 %. Такие изделия за счет снижения массы

быстрее разогреваются в автоклаве, что сокращает расход энергии.

Повышение эффективности строительства во многом определяется снижением материалоемкости строительных конструкций и снижением их теплопроводности без существенных потерь несущей способности. Кроме того, особую актуальность приобретают задачи получения эффективных теплоизоляционных материалов.

С использованием изучаемых сырьевых ресурсов получены ячеистые конструкционно-теплоизоляционные и теплоизоляционные материалы с низкими энергозатратами на производство. Высокая дисперсность сырья позволяет исключить его предварительный помол при изготовлении сырьевой смеси. Время изотермической выдержки изделий в автоклаве сокращается в два раза.

Возможно снижение давления автоклавной обработки без существенного снижения физико-механических свойств изделий. Снижение давления автоклавной обработки особенно актуально для тех предприятий, на которых автоклавы исчерпали свой ресурс.

Полученные конструкционно-теплоизоляционные и теплоизоляционные материалы обладают высокими физико-механическими характеристиками (табл. 3). Предел прочности при сжатии таких материалов на 15–20% выше, чем на традиционном известково-песчаном сырье, а теплопроводность меньше на 10–15%.

Фазовый состав цементирующего соединения ячеистых бетонов на основе песчано-глинистых пород более сложный, что снижает его теплопроводность в сравнении с цементирующим соединением на основе известково-песчаного вяжущего. За счет этого снижается теплопроводность межпоровых перегородок и соответственно теплопроводность ячеистого бетона в целом (табл. 3).

В последние десятилетия население городов и особенно мегаполисов столкнулось с новой проблемой – шумовой агрессией. Человек все больше страдает от ее пагубного воздействия. Учитывая отрицательное воздействие шума на человеческий организм, большое значение для строительной индустрии имеет разработка нового поколения акустических материалов, которые позволят поглощать большую часть кинетической энергии звуковой волны и снизить негативное воздействие шума.

На основе нетрадиционного сырья получены как звукопоглощающие, так и звукоотражающие материалы, использование которых в строительстве не только позволит снизить себестоимость производства и затраты на эксплуатацию конечной продукции, но и существенно улучшит комфортность среды обитания человека. Полученные акустические материалы имеют откры-

**Таблица 3**  
**Свойства ячеистых бетонов на основе глинистых пород незавершенной стадии минералообразования**

Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа	Влажностная усадка, мм/м	Марка по морозостойкости, F	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)
Конструкционно-теплоизоляционные				
700	4,5–5,4	0,4–0,5	15–25	0,14–0,16
500	2,9–3,4	0,45–0,5	15–25	0,1–0,11
Теплоизоляционные				
400	2–2,4	–	–	0,08–0,09
250	0,7–0,8	–	–	0,053–0,055

тую, закрытую и сообщающуюся пористость, а также сочетают крупные и мелкие поры, что обуславливает эффективное звукопоглощение в широком диапазоне частот звуковой волны (рис. 3). За счет полиминерального состава цементирующего соединения и большого количества гетерозернистых кристаллических фаз, формирующих мелкопористые перегородки, эффективность звукопоглощения значительно выше, чем известково-песчаных автоклавных материалов с мономинеральным составом новообразований.

Актуальной задачей является получение стеновых материалов, обладающие не только высокими эксплуатационными, но и декоративными качествами, к которым относится колористика. Коэффициент белизны силикатного кирпича составляет 55–60% от эталона белизны сульфата бария, что позволяет окрашивать его в любой цвет. Наиболее эффективным способом является объемное окрашивание. Глинистые породы незавершенной стадии минералообразования обладают широкой цветовой гаммой: желтый, коричневый, красный и т. д. Это позволяет использовать их для получения ши-

рокой номенклатуры объемно-окрашенных отделочных материалов: колотого силикатного кирпича, декоративной силикатной плитки, облицовочной плитки, декоративно-акустических материалов (рис. 4).

Важно отметить, что введение в технологию силикатного производства глинистых пород незавершенной стадии минералообразования для частичной или полной замены традиционного песка не повлечет кардинального изменения технологических линий.

Таким образом, установлена возможность замены части традиционной сырьевой базы автоклавных силикатных материалов — песка — на глинистые породы незавершенной стадии минералообразования. Предложена широкая номенклатура эффективных автоклавных материалов на их основе, в том числе стеновых, отделочных, конструкционно-теплоизоляционных, теплоизоляционных и акустических. Использование таких пород позволит не только расширить сырьевую базу силикатных материалов и снизить энергоемкость их производства, но и улучшить экологическое состояние окружающей среды и создать комфортные условия проживания человека.

#### Список литературы

1. Боженов П.И. Комплексное использование минерального сырья и экология. М.: АСВ, 1994. 264 с.
2. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов. М.: МГСУ, 2013. 203 с.
3. Лесовик В.С., Фролова М.А., Айзенштадт А.М. Поверхностная активность горных пород // *Строительные материалы*. 2013. № 11. С. 71–73.
4. Чернышов Е.М., Федин А.А., Потамоснева Н.Д., Кухтин Ю.А. Газосиликат: современная гибкая технология материала и изделий // *Строительные материалы*. 2007. № 4. С. 4–9.
5. Володченко А.Н., Лесовик В.С. Силикатные автоклавные материалы с использованием нанодисперсного сырья // *Строительные материалы*. 2008. № 11. С. 42–44.
6. Лесовик В.С. Геоника (Геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. 2-е изд. Белгород: БГТУ, 2016. 287 с.
7. Строкова В.В., Сумин А.В., Нелюбова В.В., Шаповалов Н.А. Модифицированное вяжущее с использованием наноструктурированного минерального компонента // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2015. № 3. С. 36–39.
8. Володченко А.Н., Лесовик В.С. Реологические свойства газобетонной смеси на основе нетрадиционного сырья // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2012. № 3. С. 45–48.
9. Боженов П.И. Технология автоклавных материалов. Л.: Стройиздат, 1978. 368 с.
10. Хвостенков С.И. О химизме процесса взаимодействия в системе  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{--SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  в условиях гидротермального синтеза // *Строительные материалы*. 2008. № 5. С. 76–81.
11. Строкова В.В., Везенцев А.И., Колесников Д.А., Шиманская М.С. Свойства синтетических нанотубулярных гидросиликатов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2010. № 4. С. 30–34.
12. Жерновский И.В., Нелюбова В.В., Череватова А.В., Строкова В.В. Особенности фазообразования в системе  $\text{CaO--SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  в присутствии наноструктурированного модификатора // *Строительные материалы*. 2009. № 11. С. 100–102.

#### References

1. Bozhenov P.I. Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ja i jekologija [Complex use of mineral raw materials and ecology]. Moscow: ACB, 1994. 264 p. (In Russian).
2. Bazhenov Y.M., Alimov L.A., Voronin V.V. Struktura i svoystva betonov s nanomodifikatorami na osnove tekhnogennykh otkhodov [Structure and properties of concrete with nanomodifiers based on man-made waste]. Moscow: MGSU, 2013. 203 p. (In Russian).
3. Lesovik V.S., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M. Surface Activity of Rocks // *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 11, pp. 71–73. (In Russian).
4. Chernyshov E.M., Fedin A.A., Potamoshneva N.D, Kuhtin Ju.A. Gazosilikata: modern a flexible technology materials and products // *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 4, pp. 4–9. (In Russian).
5. Volodchenko A.N., Lesovik V.S. Silicate materials with autoclave is-use of nanosized materials. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 11, pp. 42–44. (In Russian).
6. Lesovik V.S. Geonika (Geomimetika). Examples of implementation of the builder-rated materials science: a monograph. 2nd ed. Belgorod: BDTU, 2016. 287 p.
7. Strokova V.V., Sumin A.V., Nelyubova V.V., Shapovalov N.A. The modified binder using nanostructured mineral component. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2015. No. 3, pp. 36–39. (In Russian).
8. Volodchenko A.N., Lesovik V.S. The rheological properties of gas concrete mixture on the basis of non-traditional raw materials. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2012. No. 3, pp. 45–48. (In Russian).
9. Bozhenov P.I. Tekhnologiya avtoklavnykh materialov [Technology autoclave materials]. Moscow: Stroyizdat, 1978. 368 p. (In Russian)
10. Hvostenkov S.I. About the chemistry of the process of interaction in the system  $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{--SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  in a hydrothermal synthesis. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 5, pp. 76–81. (In Russian).
11. Strokova V.V., Vezentsev A.I., Kolesnikov D.A., Shimanskaya M.S. Properties of synthetic nano-tubular Hydrosilicates. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2010. No. 4, pp. 30–34. (In Russian).
12. Zhernovsky I.V., Nelyubova V.V., Cherevatova A.V., Strokova V.V. Features of the phase formation in the system  $\text{CaO--SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$  in the presence of nanostructured modifier. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 11, pp. 100–102. (In Russian).

Е.М. ЧЕРНЫШОВ, д-р техн. наук, академик РААСН (chem@vgasu.vrn.ru),  
 В.А. ПОПОВ, канд. техн. наук, О.В. АРТАМОНОВА, канд. хим. наук (ol\_artam@rambler.ru)  
 Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84)

## Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов.

### Часть 5. Эффективное микро-, наномодифицирование систем гидротермально-синтезного твердения и структуры силикатного камня (критерии и условия)

Рассмотрена проблема эффективности микро-, наномодифицирования систем гидротермально-синтезного твердения и структуры силикатного камня. Показано взаимосвязанное и совместное закономерное проявление действия нанотехнологических принципов «сверху – вниз» и «снизу – вверх» при структурообразовании силикатных автоклавных материалов. Исследованы и количественно оценены кинетические характеристики гетерогенного процесса формирования системы гидротермально-синтезного твердения в зависимости от технологических факторов. Сравнительный анализ эффективности микро-, наномодифицирования процесса структурообразования при регулировании основных технологических факторов показал, что при рациональных сочетаниях и значениях факторов, относимых к принципу «сверху – вниз» и «снизу – вверх», ускорение синтеза цементирующих веществ может быть двух-трехкратным. Дана систематика средств из арсенала «нано» для возможного повышения эффективности процессов структурообразования силикатного камня по критериям E, τ, R.

**Ключевые слова:** гидротермально-синтезная система твердения, микро- и наномодифицирование, эффективность модифицирования структуры.

E.M. CHERNYSHEV, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS (chem@vgasu.vrn.ru),  
 V.A. POPOV, Candidate of Sciences (Engineering), O.V. ARTAMONOVA, Candidate of Sciences (Chemistry) (ol\_artam@rambler.ru)  
 Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering (84, 20-letiya Oktyabrya Street, 394006, Voronezh, Russian Federation)

#### Concepts and Substantiations of Nano-Modification Technology of Building Composites Structures. Part 5. Efficient Micro-, Nano-Modification of Hydrothermal-Synthesis Hardening Systems and Structure of Silicate Stone (Criteria and Conditions)

Problems of the efficiency of micro-, nano-modification of the hydrothermal-synthesis hardening system and the structure of silicate stone are considered. The interconnected and joint regular manifestation of actions of nano-technological principles "top – down" and "bottom – up" during the structure formation of silicate autoclaved materials is shown. Kinetic characteristics of the heterogenic process of formation of the hydrothermal-synthesis hardening depending on technological factors are studied and quantitative assessed. The comparative analysis of the efficiency of micro- and nano-modifying process of structure formation, when regulating main technological factors, shows that at rational combinations and values of factors related to the principle "top – down" and "bottom – up", the synthesis of cementing substances can be accelerated by two-three times. The systematics of means from the "nano" arsenal for possible improving the efficiency of processes of silicate stone structure formation according to criteria E, τ, R is presented.

**Keywords:** hydrothermal-synthesis system of hardening, micro- and nano-modification, efficiency of structure modification.

В данной статье в контексте публикаций по проблеме «концепций и оснований технологии наномодифицирования структуры строительных композитов» обсуждаются гидротермально-синтезные системы твердения и соответственно представляются возможные решения по управлению структурообразованием силикатного камня и строительных композитов на его основе. При этом особенностью пятой части является переосмысление и обобщение полученных ранее [1–3] данных с позиций нанохимического подхода [4–6].

Актуальность вопроса о возможности использования средств из арсенала «нано» для повышения эффективности производства силикатных автоклавных материалов делает обоснованным обращение к следующим исходным предпосылкам.

В гидротермально-синтезной системе твердения, как в никакой другой из ранее рассмотренных [7, 8], наиболее четко прослеживается взаимосвязанное и совместное проявление и действие нанотехнологических принципов «сверху – вниз» и «снизу – вверх» (рис. 1). Это необходимо и принципиально важно подчеркнуть.

Действительно, формирование структуры силикатного камня и его цементирующих веществ обуславливается определяющим и непосредственным значением

технологии подготовки щелочно-кислотных (к примеру, известково-кремнеземистых) сырьевых смесей для развития процессов синтеза новообразований. Проявление этого состоит в прекурсорной (подготовительной) роли механоактивированных щелочно-кислотных компонентов при реализации принципа «снизу – вверх» в эволюционном маршруте «рождения» самих новообразований.



**Рис. 1.** Периодизация стадий гидротермального синтеза цементирующих веществ в условиях «нано», наномодифицирования: I – проявление действия принципа «сверху – вниз» в периодах; II – проявление действия принципа «снизу – вверх» в периодах; А – область преимущественного кинетического контроля развития процесса синтеза; Б – область преимущественного диффузионного контроля развития процесса

В отличие от силикатных в цементных системах твердения технологически используют готовое вяжущее. При этом мера прекурсорной роли нанотехнологического принципа «сверху – вниз» в производстве реальных цементных бетонов принимается обычно как «данность», если поступающий на предприятие цемент не подвергается какой-либо дополнительной обработке. В случаях же, относящихся к тонкомолотым цементам, наполненным цементам, вяжущим низкой водопотребности, принцип «сверху – вниз» в его проявлениях становится проблемой специального рассмотрения, исследования и технологической реализации. В производстве силикатных автоклавных материалов эта проблема существует изначально.

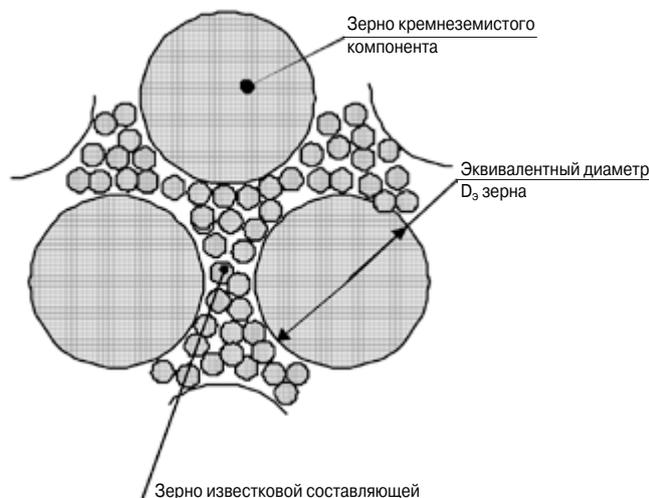
Из вышеизложенного следует, что эффективное микро-, наномодифицирование систем гидротермально-синтезного твердения и структуры силикатного камня требуют особого и более глубокого рассмотрения существа проявления принципа «сверху – вниз» в системном соотношении его с принципом «снизу – вверх».

Содержательно нанотехнологический принцип «снизу – вверх» в системах гидротермально-синтезного твердения и структурообразования силикатного камня подобен системам гидратационного твердения и структурообразования цементного камня, и в первую очередь в процессах эволюционного маршрута конденсации и формирования структурных элементов твердой фазы из насыщенных и пересыщенных растворов, содержащих соответствующие анионы и катионы сопоставляемых систем.

В этом смысле в любой технологии строительных композитов принципы «сверху – вниз» и «снизу – вверх» являются общезначимыми. Они сочленяются и накладываются, представляя части единого процесса, и находятся во взаимодействии, взаимовлиянии и соподчиненности.

Опираясь на изложенные исходные посылки, представим логику и содержание системного соотношения места обсуждаемых нанотехнологических принципов в технологии гидротермально-синтезного твердения.

**В композиционной структуре** конгломератных строительных материалов, в том числе и силикатных автоклавных, выделяются два типа структур по их **генезису**:



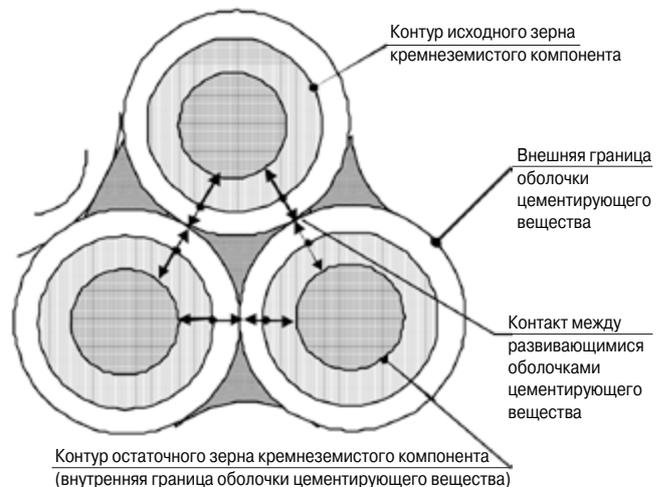
**Основные пространственно-геометрические параметры:**  
 $D_3$  – эквивалентный диаметр кремнеземистого зерна;  
 $V_{лк}$  – объем зерен кремнеземистого компонента;  
 $V_{мз}$  – межзерновой объем кремнеземистого компонента;  
 $S_{км}$  – и  $S_{кко}$  – удельные площади поверхности кремнеземистых частиц соответственно в расчете на единицу массы и объема;  
 $t_3 \text{ min}$  – эквивалентное расстояние между соседними кремнеземистыми частицами;  
 $N_{лк}$  – количество «контактов» между кремнеземистыми зернами в единице объема

Рис. 2. Геометрическая модель системы сложения [2]

- **первый**, относящийся к масштабным уровням макро-, мезо- и микро-, может связываться с закономерностями формирования систем сложения готовых и меняющихся (по мере протекания процессов технологии) зернистых частиц исходных компонентов [1];
- **второй**, относящийся к микро-, субмикро- и наноразмерам, может квалифицироваться как результат синтеза новых частиц в эволюционном маршруте [5, 6, 9] их образования из насыщенных и пересыщенных анионами и катионами растворов. Оба типа структур интегрированы в композите.

Конструирование и формирование **первого типа структуры** осуществляется по концепциям и основаниям прежде всего **механики зернистых сред**, рассматривающей проблемы геометрии упаковок исходных частиц сырьевых смесей, и механики гетерогенных дисперсных систем, коллоидной химии [10]. Одновременно с этим, учитывая роль и значение величины и свойств поверхности раздела фаз Т – Ж в сырьевой смеси, в расчет должны приниматься и следствия нанотехнологической реализации принципа «сверху – вниз» с его соответствующими эффектами, являющимися предметом изучения **механохимии** [11–13]. Получение последних, как известно, связывается с изменением энергетического состояния структуры и соответственно физической и/или физико-химической активности поверхностных и внутренних объемов частиц исходных щелочных и кислотных компонентов по мере их измельчения механическими или физическими способами. При этом важно иметь в виду, что проявление эффектов в принципе «сверху – вниз» требуется связывать не только с получаемым нано-, микроразмером частиц, но и с мерой аморфизации их поверхностных объемов, насыщаемых в ходе механохимической активации структурными дефектами наноразмерного диапазона [12].

Формирование **второго типа структуры** реализуется в рамках действия нанотехнологического принципа «снизу – вверх» и осуществляется по механизмам конденсации вещества, что является предметом термодинамики равновесных и неравновесных систем, химической кинетики гомогенных и гетерогенных процессов в дисперсных системах, кристаллохимии и в целом химии



**Обозначения:**  
 ← → – направления роста объема цементирующего вещества от исходной поверхности;  
 [штрихованная область] – цементирующее вещество на месте израсходованного объема кремнеземистого материала;  
 [белая область] – цементирующее вещество части оболочки новообразований, развивающейся в межзерновой объем до контактирования оболочек;  
 [серая область] – цементирующее вещество, развивающееся в межзерновом объеме после момента контактирования оболочек новообразований

Рис. 3. Геометрическая модель силикатного микробетона как результат взаимодействия системы сложения и системы роста [2]

твёрдого тела [11]. Соответствующие научные основания формирования второго типа структуры соотносятся с толкованием общего явления конденсации вещества, с пониманием и характеристикой эволюционного маршрута синтеза новообразований цементирующего вещества с его стадиями зарождения фазы, роста, агломерации, самоорганизации во времени частиц новообразований [9]. Именно это дает возможность анализировать эффекты микро-, наномодифицирования на данных стадиях и обозначать факторы управления конденсацией и ее эволюционным маршрутом [5].

Оба принципа наномодифицирования, реализуемые при формировании первого и второго типа структур, действуют, таким образом, в рамках своих законов и опираются на свой «арсенал нано» в едином технологическом процессе получения автоклавных силикатных материалов.

В общей постановке эффекты наномодифицирования как результат действия «арсенала нано» от принципа «сверху – вниз» выражается в роли и влиянии механохимической метаморфизации структуры исходных компонентов [12, 13], а от принципа «снизу – вверх» – в роли и влиянии факторов стереохимии [14, 15], фактора топохимической «памяти» [16].

Принцип «сверху – вниз», отражая, как уже отмечалось, прекурсорную (подготовительную) роль в нанотехнологии, обеспечивает активацию исходных компонентов сырьевых смесей. И в прямой зависимости от этого развивается эволюционный маршрут формирования микро-, наноструктуры твердой фазы по принципу «снизу – вверх». В данной трактовке обоснованным и уместным видится использованное ранее [1] представление о процессе «рождения» структуры силикатного автоклавного материала как следствия соответствующего закономерного взаимодействия (по терминологии Л.В. Радужкевича [17]), исходной «системы сложения»

зернистых и дисперсных частиц и образующейся «системы роста» нано-, микрокристаллов и кристаллов. В результате такого взаимодействия структура материала в любой момент его получения оказывается композицией из системы сложения и системы роста на определенной стадии их развития и преобразования.

Таким образом, принципы «сверху – вниз» и «снизу – вверх», действительно, находятся в системном единстве, а их «присутствие» в традиционной технологии и в нанотехнологии строительных материалов является объективным фактом.

Соответственно изложенным предпосылкам, актуальным в постановке представляемых исследований, видится рассмотрение следующих вопросов:

1) структуры формирующегося силикатного камня как объекта микро-, наномодифицирования;

2) определяющих закономерностей структурообразования систем гидротермально-синтезного твердения;

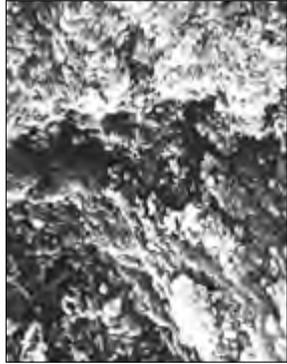
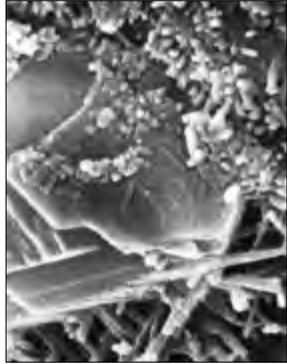
3) кинетики и кинетических характеристик гетерогенных процессов формирования систем гидротермально-синтезного твердения в зависимости от технологических факторов, отражающих действие принципов «сверху – вниз» и «снизу – вверх», «наполняемых» соответствующими действиями из арсенала «нано»;

4) обоснования средств из арсенала «нано» для возможного повышения эффективности процессов структурообразования силикатного камня по критериям *E*, *t*, *R*.

**Структура силикатного камня как объект микро-, наномодифицирования; определяющие закономерности формирования систем гидротермально-синтезного твердения**

Силикатный камень как объект микро-, наномодифицирования необходимо рассматривать с учетом начальной пространственно-геометрической его структу-

**Таблица 1**

Морфологическая разность	Скрытокристаллическая	Волокнисто-игольчатая	Пластинчато-призматическая
Данные растровой электронной микроскопии			
Минералогический состав	Высокоосновные гидросиликаты кальция (ГСК)	Преимущественно ГСК тоберморитовой группы	Портландит и высокоосновные ГСК на начальной стадии автоклавной обработки; тоберморит при большой длительности обработки
Размер частиц и кристаллов, нм	До 100–300	Поперечный размер 100–500; длина:поперечный размер ≈ 10:1	Поперечный размер 800–1300; длина:поперечный размер ≈ 3:1
Число контактов в единице объема, 1/см <sup>3</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup>
Тип контактов частиц и кристаллов	Контакты примыкания глобуловидных частиц	Преимущественно контакты примыкания кристаллов; контакты срастания	Контакты примыкания, срастания, прорастания кристаллов
Удельная площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г	≈ 500	≈ 100–200	≈ 30–50
Теплота смачивания, Дж/г	≈ 100–200	≈ 30–40	≈ 15–20
Средний эффективный радиус пор, нм	5–7 и менее	≈ 20–40	≈ 40–80

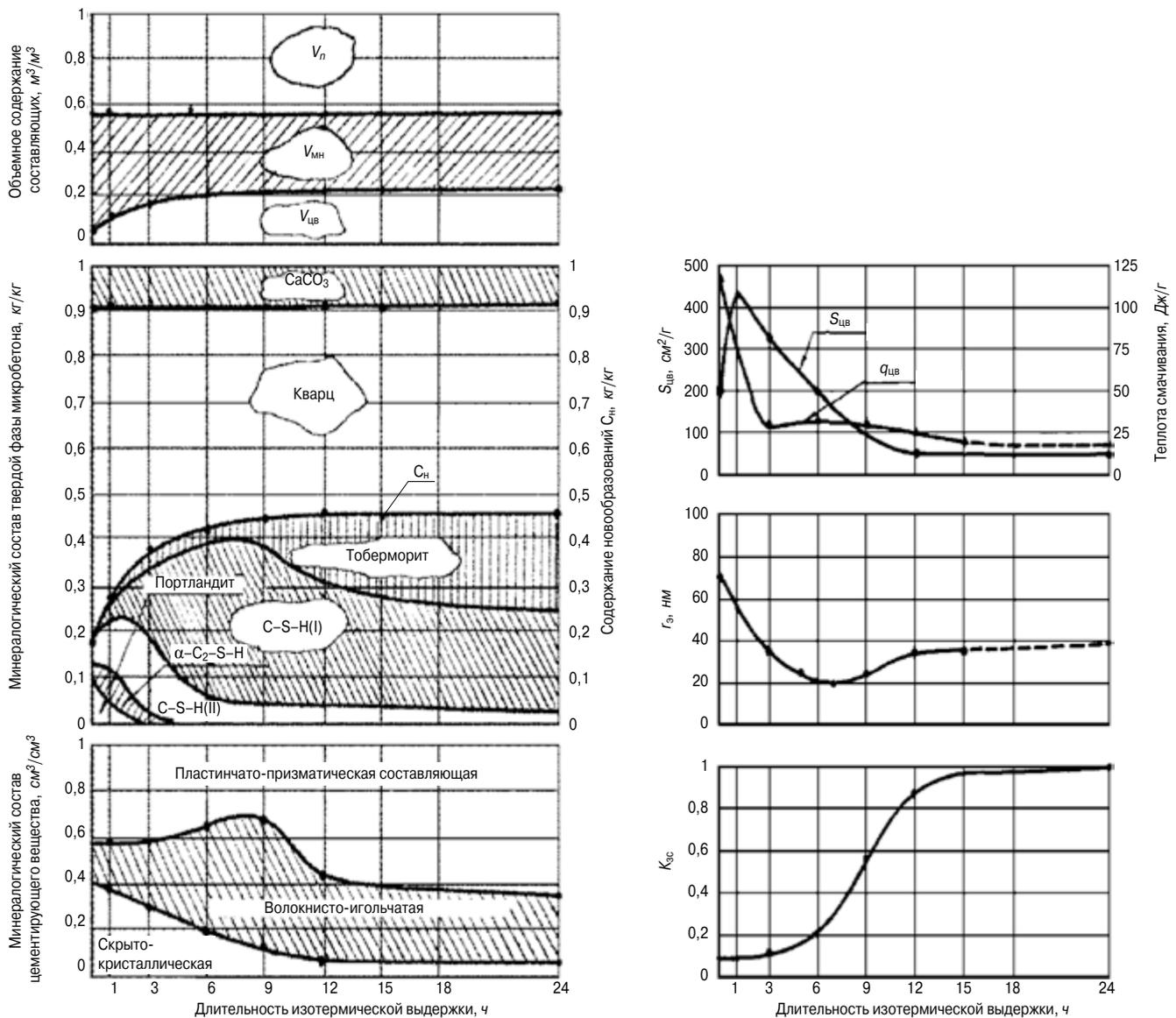


Рис. 4. Закономерности изменения параметров развития структурных параметров силикатного микробетона в процессе гидротермального синтеза его цементирующего вещества [1]

ры, включающей исходные зернистые и дисперсные частицы щелочного (основного) и кислотного компонентов с их параметрами размера, упаковки, межчастичных контактов, межзерновых зазоров, суммарной и удельной площади поверхности и т. п. [2].

Подобно [7] следует исходить из того, что в этой структуре непосредственный гидротермальный синтез цементирующих веществ силикатного камня развивается как гетерогенный процесс. При этом система роста по мере накопления цементирующего вещества занимает часть «исчезающего» в результате гидротермальных реакций объема щелочного, например извести, и кислотного, например кремнезема, компонентов и размещается, кроме того, в объеме межзернового пространства системы сложения их частиц (рис. 2, 3). Вследствие этого исходная величина межзерновой пустотности системы сложения не сохраняется, так как большая часть объема зерен извести (за исключением карбоната кальция) гидратируется и совместно с частью объема зерен кремнеземистого компонента расходуется в эволюционном маршруте синтеза новообразований (т. е. при реализации принципа «снизу — вверх»). Пустотность исходной системы сложения, таким образом, как бы увеличивается. Отсюда следует,

что объем цементирующего вещества, необходимый для монолитизации частиц кремнеземистого компонента, оказывается большим первоначального объема пустот в нем. Новый объем межзернового пространства системы сложения заполняется цементирующим веществом скрытокристаллической, пластинчато-призматической, волокнисто-игльчатой морфологических разновидностей с характерным для них объемом и распределением объема пор по размерам, включая поры наномасштабного диапазона (табл. 1). В эволюционном маршруте структура новообразований и структура пористости непрерывно меняются (рис. 4).

Динамика упрочнения материала (его отвердевания) в процессе формирования новообразований в гидротермально-синтезной системе оказывается связанной с реализацией двух условий: 1) появление контактов между развивающимися оболочками и сшивка их в пространственную конструкцию, обладающую сопротивлением механическому нагружению (упругостью и прочностью); 2) заполнение оставшегося объема межзернового пространства кристаллизующимися новообразованиями, обеспечивающими дополнительное количество контактов и «расширение» площади контактирования в системе роста (см. рис. 3).

Эффект от реализации этих двух условий упрочнения представлен предложенной нами моделью динамики отвердевания (рис. 5). В этой динамике можно различать периоды  $\tau_1$  и  $\tau_2$  реализации условий, соответствующие им относительные объемы образованного цементирующего вещества и достигаемые в эти периоды прочностные характеристики силикатного камня  $R_{b1}$  и  $R_{b2}$ .

В модели участок «а–б» незначительного начального повышения прочности соответствует периоду «0– $\tau_1$ » постепенного формирования оболочек цементирующего вещества; участок «б–в» скачкообразного упрочнения соответствует завершению стадии формирования контактов оболочек с выполнением первого условия упрочнения, т. е. возникновения контактов оболочек; участок «в–г» постепенного упрочнения связан с проходящим и завершающимся зарастанием цементирующим веществом межзернового объема; участок «г–д» относительного сохранения достигнутой прочности определяется относительной стабильностью качества цементирующего вещества при предельно достигнутом его содержании; участок «д–е» снижения прочности материала отражает влияние возможной рекристаллизации новообразований (рис. 5).

В реальных кривых упрочнения (кривая 2, рис. 5) в отличие от модели нет резких переходов от одного участка к другому, поскольку этапы стадий структурообразования взаимно накладываются; влияет и различие кинетики протекания процессов в разных микрообъемах, обусловленное факторами неравномерности тепломассопереноса по объему материала при автоклавной его обработке. В результате контактирование и соединение оболочек из новообразований в пространственный каркас (участок «б–в») не является одномоментным, а растянуто во времени.

### Кинетические характеристики процессов формирования систем гидротермального синтеза твердения

Представленные результаты исследований определяющих закономерностей формирования систем гидротермально-синтезного твердения позволяют перейти к рассмотрению вопросов управления кинетикой и кинетическими характеристиками процессов в зависимости от влияния технологических факторов, «представляющих» действие принципов «сверху – вниз» и «снизу – вверх» и соответственно «арсенала нано».

В этой связи целесообразно вернуться к схеме (рис. 1), которая, во-первых, касается формирования и гидротермального синтеза цементирующих веществ силикатного камня в доавтоклавный, автоклавный и послееавтоклавный периоды, «местоположения» кинетической и диффузионной составляющих в реализации гетерогенной реакции взаимодействия щелочного и кислотного компонентов, и, во-вторых, обозначает периоды преимущественного проявления действия принципов «сверху – вниз» и «снизу – вверх», а также совместного их действия.

В этой связи необходимо дать и кибернетическую схему (рис. 6) формализации общего механизма процесса гидротермального синтеза цементирующих веществ в условиях микро-, наномодифицирования структуры в задаче управления процессом. Предлагаемая схема позволяет программировать экспериментальные исследования и методику их постановки.

Рассмотрение вопросов управления процессом синтеза следует основывать на представлении этапа автоклавной обработки как находящегося в закономерной взаимосвязи с другими предшествующими этапами технологии.

С учетом изложенного обоснованы входные факторы управления, представленные совокупностью параметров предшествующих технологических этапов и не-

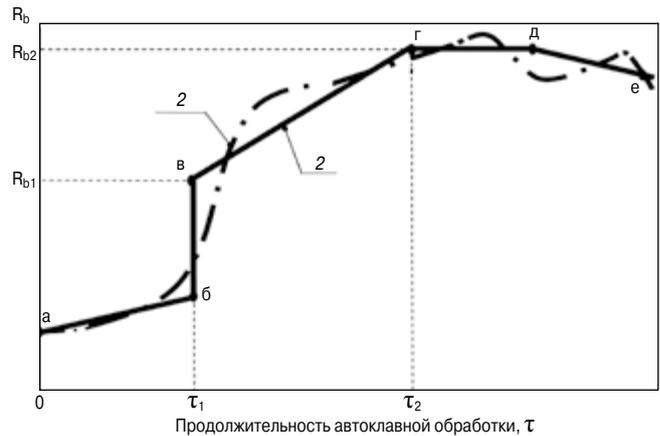


Рис. 5. Модель динамики синтеза прочности силикатного микробетона: 1 – формальная модель упрочнения; 2 – обобщенный вид реальных кривых упрочнения

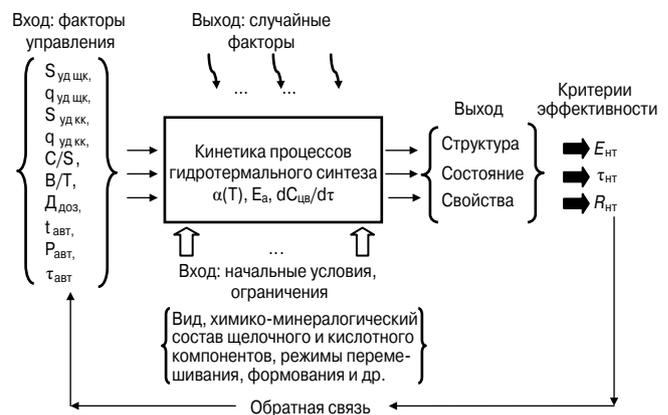


Рис. 6. Формализация общего механизма гидротермального синтеза цементирующих веществ в условиях микро-, наномодифицирования структуры силикатного камня

посредственно этапа автоклавирования (рис. 6). В качестве таких факторов приняты:

- состав сырьевой смеси, характеризуемый величиной  $C/S$ ;
- степень дисперсности и величина удельной поверхности энергии соответственно частиц щелочного  $S_{уд.щк}$ ,  $q_{уд.щк}$  и кремнеземистого  $S_{уд.кк}$ ,  $q_{уд.кк}$  компонентов;
- величина водотвердого отношения  $V/T$ ;
- дозировка  $D_{доз}$  нанокристаллической затравки;
- параметры используемого пара – его температура  $t_{авт}$  и давление  $P_{авт}$ ;
- продолжительность отдельных этапов и всего периода автоклавирования  $\tau_{авт}$ .

В качестве начальных условий и ограничений учитывались вид, химико-минералогический состав щелочного и кислотного компонентов, условия подготовки компонентов смеси, режимы перемешивания, формования и т. п.

На выходе у объекта управления контролировались параметры состава, структуры и состояния формируемой цементирующей связки. Они характеризовались массовой долей цементирующих веществ в твердой фазе материала  $C_{щв}$ , коэффициентом основности  $K_{осн}$ , удельной поверхностью  $S_{уд.щв}$ , удельной активностью поверхности новообразований  $q_{уд.щв}$ , коэффициентом завершения процесса структурообразования  $K_{зс}$  (рис. 4).

Кинетические и энергетические характеристики процесса синтеза, а именно его температурный коэффициент скорости  $\alpha(T)$ , скорость  $dC_{щв}/dt$ , эффективная энергия активации  $E_a$ , оценивались как следствие

влияния входных факторов управления, начальных условий, ограничений, случайных факторов на развитие процесса гидротермального синтеза, на его выходы.

Имея в виду решение задачи повышения эффективности технологии гидротермально-синтезного твердения по критериям  $E_{нт}$ ,  $\tau_{нт}$ ,  $R_{нт}$ , в экспериментах обращались к рассмотрению зависимости кинетических характеристик гетерогенного процесса от условий управления ими посредством варьирования рецептурно-технологических факторов согласно общей зависимости:

$$(E_{нт}, \tau_{нт}, R_{нт}) = f[t_{авт}, \tau_{авт}, \alpha(T), dC_{св}/d\tau, E_d] = \varphi [RT\Phi_{трад}; RT\Phi_{нт}], \quad (1)$$

где  $RT\Phi_{трад}$  – традиционные рецептурно-технологические факторы;  $RT\Phi_{нт}$  – факторы из «арсенала нано»,

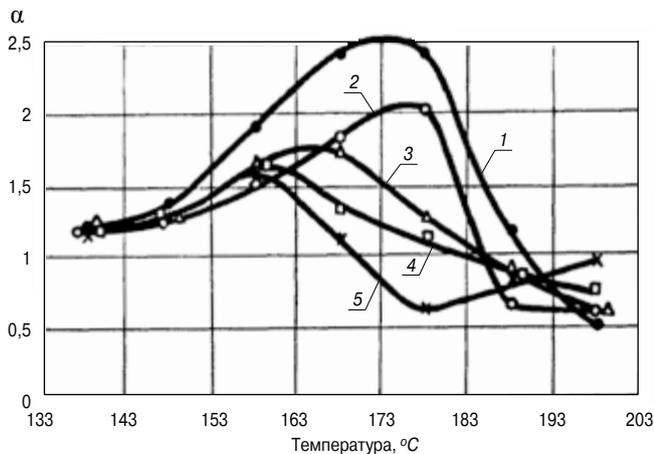


Рис. 7. Зависимость температурного коэффициента скорости связывания  $SiO_2$  в новообразования ( $\alpha$ ) в смесях с различной степенью измельчения кремнеземистого компонента ( $S_{кк}$ ) от температуры автоклавной обработки  $t_{авт}$ : 1 – для удельной площади поверхности  $S_{кк}$  100  $m^2/kg$ ; 2 – 200  $m^2/kg$ ; 3 – 300  $m^2/kg$ ; 4 – 400  $m^2/kg$ ; 5 – 500  $m^2/kg$

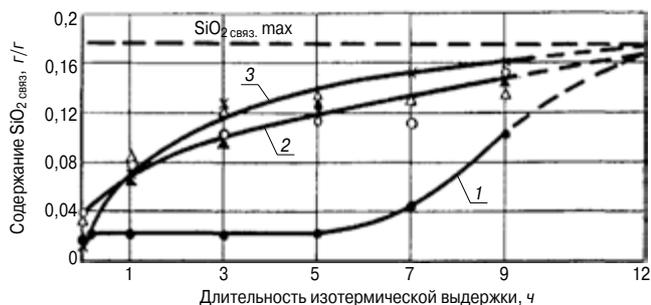


Рис. 8. Кинетика связывания  $SiO_2$  в гидросиликаты кальция в зависимости от величины  $V/T$ : 1 – 0,2; 2 – 0,4; 3 – 1

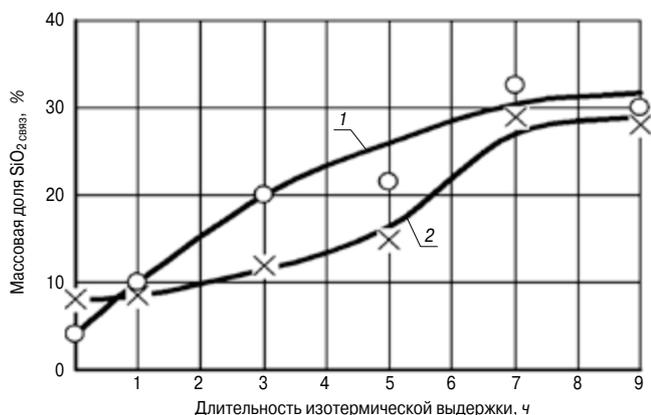


Рис. 9. Изменение массовой доли  $SiO_{2связ}$  в смесях различного способа получения: 1 – совместный помол; 2 – раздельный помол

относящиеся к нанотехнологическим принципам «сверху – вниз» и «снизу – вверх» (табл. 2).

С кинетической точки зрения для каждого значения удельной площади и удельной активности поверхности кремнеземистого компонента (как факторов принципа «сверху – вниз») существует своя оптимальная область значений температуры (как факторов принципа «снизу – вверх»), при которой достигается максимально возможная скорость процесса накопления цементирующих веществ. Об этом свидетельствуют представленные на рис. 7 данные, отражающие величины температурного коэффициента скорости синтеза цементирующей связки для смесей с исходной удельной площадью поверхности молотого кварцевого песка 100; 200; 300; 400 и 500  $m^2/kg$ .

К полученным результатам уместно дать следующие пояснения. Развитие гидротермального синтеза цементирующего вещества как гетерогенного физико-химического процесса образования новой фазы находится под лимитирующим влиянием скорости собственно химического взаимодействия компонентов и скорости диффузии реагирующих веществ в зону их взаимодействия. От соотношения лимитирующего влияния кинетической и диффузионной составляющих процесса зависит его общая скорость и энергетика протекания. Управление этим соотношением обеспечивается регулированием системы структурообразующих технологических факторов непосредственно на этапе автоклавной обработки (температуры, скорости подвода теплоты, продолжительности теплового воздействия), а на предшествующих этапах технологии – степени измельчения кремнеземистого компонента (его удельной поверхности и активности поверхности).

С повышением температуры скорость диффузии оказывается лимитирующим фактором, поскольку скорость собственно химического взаимодействия возрастает с повышением температуры быстрее, чем скорость диффузии. В итоге реакция переходит в область все более сильного диффузионного контроля. Имеет место

Таблица 2

Рецептурно-технологические факторы	Диапазон значений
Удельная поверхность кремнеземистого компонента, $m^2/kg$	50–500
Массовая доля $CaO$ в известково-песчаной смеси, %	9–42
$V/T$ , г/г	0,2–1
Температура автоклавной обработки, $^{\circ}C$	151–203
Длительность изотермической выдержки, ч	0–24
Дозировка нанокристаллической завтравки, мас. %	0–0,1

Таблица 3

Факторы управления	Отнесение проявления факторов к принципу	
	«сверху – вниз»	«снизу – вверх»
Состав смеси по $C/S$	$C/S$	$C/S$
Состав смеси по $V/T$	–	$V/T$
Степень помола компонентов и смеси	$S_{уд.шк}$	$q_{уд.шк}$
Способ помола компонентов и смеси (раздельный или совместный)	$S_{уд.кк}$	$q_{уд.кк}$
Введение нанодобавок	–	$D_{доз}$
Температура автоклавной обработки	–	$t_{авт} (P_{авт})$
Продолжительность автоклавной обработки	$\tau_{авт}$	$\tau_{авт}$

Таблица 4

Показатели эффективности	Удельная поверхность молотого кварцевого песка, м <sup>2</sup> /кг	Значение показателей при температуре, °С (давлении, МПа) автоклавной обработки		
		162 (0,6)	183 (1)	203 (1,6)
$R_{сж\ max}$ , МПа	100	49	50	28
	300	46	60	30
	500	40	40	35
Время достижения максимума прочности, ч	100	12	8	1,5
	300	10,5	6,5	1
	500	9,5	4,5	0,5
Удельные энергозатраты, (МДж/м <sup>3</sup> )/МПа	100	10,8	22,2	32,3
	300	16,9	21,2	32,5
	500	24,3	21,2	29,1

усиление блокирования поверхности зерен кремнеземистого компонента новообразованиями по мере повышения его удельной площади поверхности и температуры автоклавной обработки, ускоряющих синтез первых порций новообразований, кристаллизующихся на зернах кремнеземистого компонента.

Фактор блокирования, ведущий к росту лимитирующего влияния диффузионной составляющей гетерогенного процесса синтеза, может давать сниженные величины температурного коэффициента скорости синтеза в 3–5 раз по отношению к предельно достижимым его значениям при оптимальных условиях (рис. 7).

Результаты исследования эволюции минералогического состава, его модифицирования свидетельствуют о том, что ускорение процесса синтеза цементирующих веществ посредством повышения степени измельчения кремнеземистого компонента в интервале значений его удельной поверхности 50–200 м<sup>2</sup>/кг сдвигает границу начала образования гидросиликатов кальция в область пониженной температуры. Но вместе с тем обнаружено, что при удельной поверхности кремнеземистого компонента свыше 300 м<sup>2</sup>/кг наблюдается уже замедление процесса образования гидросиликатов кальция тоберморитовой группы.

Совместное действие температуры и степени измельчения кремнеземистого компонента как средства из «арсенала нано» находится в закономерной связи, но характеризуется неоднозначностью и противоречивостью. Так, скорость накопления цементирующих веществ в расчете на 1 м<sup>2</sup> поверхности частиц кремнеземистого компонента в интервале значений его удельной поверхности 100–500 м<sup>2</sup>/кг увеличивается при температуре 156,5°С в 5–6 раз, а при температуре 197°С она уже уменьшается почти в два раза. И связано это именно с эффектом блокирования поверхности зерен кремнеземистого компонента быстро возникающими новообразованиями, т. е. проявлением диффузионного контроля.

Для более эффективной реализации энергии, затрачиваемой на создание дополнительной поверхности частиц кварцевого песка, целесообразно исходить из требования кинетического соответствия степени измельчения кремнеземистого компонента и принимаемой температуры автоклавной обработки.

В ряду рецептурно-технологических факторов существенное влияние на кинетику гидротермального синтеза системы твердения оказывают водотвердое отношение (рис. 8), принимаемый способ (совместный или отдельный) подготовки известково-кремнеземистой смеси (рис. 9).

Специального обсуждения требует фактор применения нанокристаллических добавок в технологии гидротермально-синтезных систем твердения.

Основная задача введения нанодобавки должна состоять, как нами полагается, в воздействии на кристаллизацию в том объеме межзернового пространства, где слабо проявляется или даже практически отсутствует структурообразующее влияние «энергетики» поверхности зерен кремнеземистого компонента.

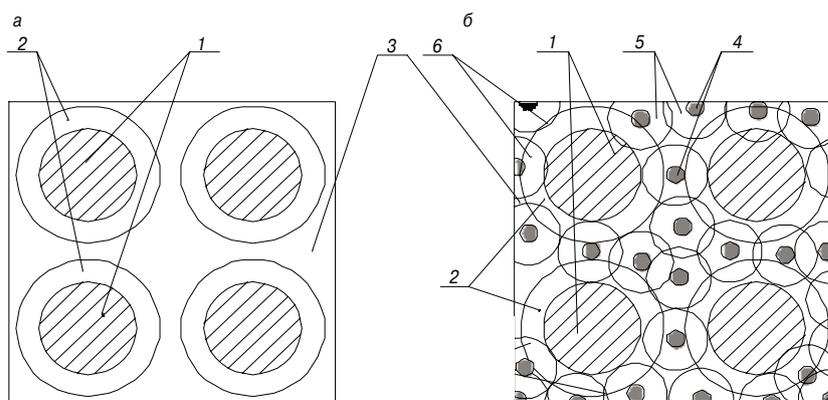


Рис. 10. Схема «зонирования» структуры межзернового пространства по совокупности выделяемых объемов структурообразования: а – без введения добавки типа кристаллической затравки; б – с добавкой типа кристаллической затравки; 1 – зерна кремнеземистого компонента; 2 – зоны структурообразующего влияния и действия поверхности кварцевых зерен; 3 – зона относительного неупорядоченного развития новообразований цементирующей связи; 4 – частицы добавки типа нанокристаллической затравки; 5 – зоны совместного структурообразующего действия поверхности частиц кремнеземистого компонента и частиц добавки типа кристаллической затравки; 6 – зоны совместного структурообразующего влияния и действия соседних частиц добавки типа нанокристаллической затравки

Рассматривая кинетическую составляющую влияния нанодобавки, целесообразно указать, что вероятность образования зародышей кристаллизации из пересыщенных растворов (а) и пропорциональна ей скорость возникновения зародышей кристаллизации отражаются известной зависимостью:

$$a = Ae^{-\frac{B\sigma^3 V_k^2}{(RT)^3 \ln \frac{c}{c_{\infty}}}} \quad (2)$$

где  $A$  – предэкспоненциальный множитель, пропорционален активационному члену  $e^{-\frac{E}{RT}}$ ;  $B$  – числовой коэффициент;  $V_k$  – молекулярный объем новообразований;  $\sigma$  – удельная поверхностная энергия новообразований (удельная межфазовая энергия);  $\frac{c}{c_{\infty}}$  – степень пересыщения.

Согласно этой зависимости скорость возникновения зародышей и роста кристаллов оказывается тем выше, чем меньше молекулярный объем  $V_k$  и удельная поверхностная энергия новообразований  $\sigma$ , чем больше степень пересыщения  $\frac{c}{c_{\infty}}$  и выше температура  $T$ . Соответственно фактором ускорения кристаллизации может стать прием изменения величин  $V_k$  и  $\sigma$  путем введения предварительно полученных центров кристаллизации, т. е., введения нанодобавки типа кристаллических затравок. Использование такой нанодобавки для интенсификации кристаллизации оказывается, как установлено, наиболее эффективным в условиях применения грубодисперсных композиций известково-си-

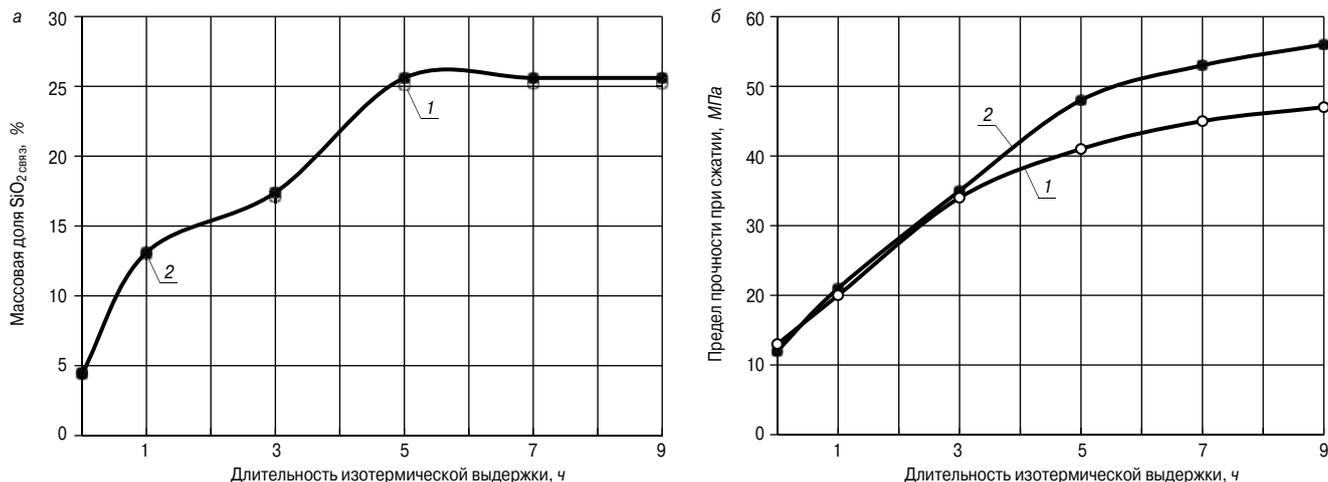


Рис. 11. Синтез цементирующих веществ (по критерию  $\text{SiO}_2$  связ.) (а) и рост прочности силикатного микробетона (б) в процессе изотермической выдержки для составов: 1 – без добавки; 2 – с нанодобавкой типа кристаллической затравки

ликатных смесей, в которых при обычных температурах автоклавирования достижение необходимой для возникновения зародышей степени пересыщения жидкой фазы может быть лимитирующим условием кристаллизации. В случае, когда образование зародышей не будет лимитирующим фактором, влияние введения нанодобавки тем не менее может быть полезным. И это оправдывается эффектами модифицирования цементирующего вещества в форме его зонирования и кластеризации (рис. 10).

На примере наиболее употребительных в заводской практике смесей с использованием кремнеземистого компонента с удельной поверхностью  $\approx 200 \text{ м}^2/\text{кг}$  и выше показано, что применение нанодобавки типа кристаллической затравки (состоящей из низкоосновных гидросиликатов кальция) практически не ускоряет синтез цементирующих веществ. Это объясняется тем, что в смесях с такой степенью измельчения кремнеземистого компонента стадия зародышеобразования и кристаллизации новообразований не является лимитирующей для развития процесса синтеза. В то же время применение нанодобавки вследствие модифицирующего ее влияния на формирование качественных характеристик кристаллического сростка позволяет повысить прочность материала по крайней мере на 20–25% (рис. 11). А это означает, что энергетические затраты на синтез прочности (в расчете на единицу измерения прочности) можно снизить не менее чем на 20%.

#### Выводы.

На основе имеющихся результатов исследований и их обобщений можно сформировать систему факторов регулирования условий синтезного твердения (табл. 3) по критериям его эффективности.

Эти факторы с точки зрения эффективности действия целесообразно анализировать, имея в виду три группы критериев.

При этом первую группу могут составлять критерии эффективности кинетики процесса структурообразования (максимальная скорость синтеза; максимальный

температурный коэффициент скорости структурообразования; минимум удельных по отношению к достигнутому количеству цементирующих веществ суммарных энергозатрат). Во вторую группу могут быть включены критерии эффективности процесса синтеза прочности, а именно: максимум удельной прочности (по отношению к синтезированному количеству цементирующих веществ); максимальная скорость повышения прочности (на сжатие) материала. К третьей группе критериев могут быть отнесены технологические критерии: минимум расхода дорогостоящей извести; минимум длительности изотермической выдержки до достижения максимального значения прочности; минимум суммарных энергозатрат (на всех технологических этапах) в расчете на единицу объема материала; минимум удельных (по отношению к достигнутой прочности материала) суммарных энергозатрат и др. (табл. 4).

Сравнительный анализ эффективности микро-, наномодифицирования процесса структурообразования при регулировании основных технологических факторов показал, что при рациональных сочетаниях и значениях факторов, относимых к принципу «сверху – вниз» и «снизу – вверх», ускорение синтеза цементирующих веществ может быть двух-трехкратным. И при этом энергосбережение может достигать значительной величины. Но наряду с этим установлено, что технологические приемы интенсификации процессов и повышения эффективности на этапе автоклавирования могут оказываться в противоречии по отношению друг к другу.

С учетом отмеченного требуется обеспечивать условия кинетического соответствия действия рецептурно-технологических факторов с точки зрения разрешения противоречий в последствиях и результатах такого действия.

Существо же обеспечения такого соответствия, как показано, предопределяется раскрытием кинетических закономерностей микро-, наномодифицирования структуры систем твердения и применением их (закономерностей) следствий в технологических задачах.

#### Список литературы

1. Чернышов Е.М. Закономерности развития структуры автоклавных материалов // *Строительные материалы*. 1992. № 1. С. 28–31.
2. Чернышов Е.М., Попов В.А. Автоклавное синтезное твердение силикатных материалов: развитие пространственно-геометрической концепции структурообразования. Достижения строительного матери-

#### References

1. Chernyshov E.M. Laws of development of the autoclave structure of materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1992. No. 1, pp. 28–31. (In Russian).
2. Chernyshov E.M., Popov V.A. Autoclave curing silicate materials synthesis: development of spatial and geometric concepts of structure. *Dostizheniya stroitel'nogo materialovedeniya* [Construction Materials

- аловедения. СПб.: ООО «Изд-во ОМ-Пресс», 2004. С. 32–39.
3. Попов В.А., Чернышов Е.М. Возможности наномодифицирования структур гидротермально-синтезных систем твердения в задачах управления сопротивлением разрушению автоклавных бетонов. *Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов: Сборник статей по материалам VII Международной научной конференции*. Воронеж: Воронежский ГАСУ. 2013. Т. 1. С. 246–251.
  4. Чернышов Е.М. Нанотехнологические исследования строительных композитов: общие суждения, основные направления и результаты // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2009. № 1. С. 45–59. [http://www.nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild\\_1\\_2009.pdf](http://www.nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild_1_2009.pdf)
  5. Артамонова О.В., Чернышов Е.М. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 1. Общие проблемы фундаментальности, основные направления исследований и разработок // *Строительные материалы*. 2013. № 9. С. 82–95.
  6. Чернышов Е.М., Артамонова О.В., Славчева Г.С. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 2. К проблеме концептуальных моделей наномодифицирования структуры // *Строительные материалы*. 2014. № 4. С. 73–84.
  7. Чернышов Е.М., Артамонова О.В., Славчева Г.С. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 3. Эффективное наномодифицирование систем твердения цемента и структуры цементного камня (критерии и условия) // *Строительные материалы*. 2015. № 10. С. 54–64.
  8. Чернышов Е.М., Потамосшнева Н.Д., Артамонова О.В. Концепции и основания технологии наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 4. Золь-гель технология нано-, микродисперсных кристаллов портландита для контактно-конденсационного компактирования структур портландитового камня и композитов на его основе // *Строительные материалы*. 2015. № 11. С. 65–74.
  9. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 309 с.
  10. Третьяков Ю.Д., Олейников Н.Н., Гудилин Е.А., Вертегел А.А., Баранов А.Н. Самоорганизация в физико-химических системах на пути создания новых материалов // *Неорганические материалы*. 1994. Т. 30. № 3. С. 277–290.
  11. Третьяков Ю.Д., Путляев В.И. Введение в химию твердофазных материалов. М.: МГУ, 2006. 400 с.
  12. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 308 с.
  13. Аввакумов Е.Г. Механохимические методы активации химических процессов. М.: Наука, 1991. 263 с.
  14. Бокий Г.Б. Кристаллохимия. М.: Наука, 1971. 400 с.
  15. Белов Н.В. Очерки по структурной минералогии. М.: Недра, 1976. 344 с.
  16. Олейников Н.Н. Эффект топохимической памяти: природа и роль в синтезе твердофазных веществ и материалов // *Российский химический журнал*. 1995. Т. 39. № 2. С. 85–94.
  17. Радушкевич Л.В. Попытки статистического описания пористых сред // *Основные проблемы теории физической адсорбции: Сборник докладов Первой всесоюзной конференции по теоретическим вопросам адсорбции*. М.: 1970. С. 270–286.
  - Achievements]. SPb.: ООО «Изд-во ОМ-Пресс». 2004. pp. 32–39.
  3. Popov V.A., Chernyshov E.M. Features nanomodification hydrothermal structures of fusion hardening systems in resistance management problems destruction autoclave concrete. *Fracture mechanics of concrete, reinforced concrete and other construction materials: A collection of articles based on VII International scientific conference*. Voronezh: Voronezhskiy GASU. 2013. Vol. 1, pp. 246–251. (In Russian).
  4. Chernyshov E.M. Nanotechnology research building composites: general judgment, the main directions and results. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyi Internet-zhurnal*. 2009. No. 1, pp. 45–59. [http://www.nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild\\_1\\_2009.pdf](http://www.nanobuild.ru/magazine/nb/Nanobuild_1_2009.pdf). (In Russian).
  5. Artamonova O.V., Chernyshov E.M. Concepts and bases of technologies of nanomodification of building composite structures. Part 1. General problems of fundamentality, main direction of investigations and developments. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 7, pp. 82–95. (In Russian).
  6. Chernyshov E.M., Artamonova O.V., Slavcheva G.S. Conceptions and bases of nano-modification technologies of building composites structures. Part 2: On the problem of conceptual models of nano-modifying the structure. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 4, pp. 73–84. (In Russian).
  7. Chernyshov E.M., Artamonova O.V., Slavcheva G.S. Concepts and technology base nanomodification of structures of building composites. Part 3. Effective nanomodification of systems and structures of cement hardening cement stone (criteria and conditions). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 10, pp. 54–64. (In Russian).
  8. Chernyshov E.M., Potamoshneva N.D., Artamonova O.V. Concepts and substantiations of nano-modification technology of building composites structures. Part 4. Sol-gel technology of nano-, micro-disperse crystals of portlandite for contact-condensation compaction of structures of portlandite stone and composites on its base *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 11, pp. 65–74. (In Russian).
  9. Melihov I.V. Fiziko-khimicheskaya evolyutsiya tverdogo veshchestva [Physico-chemical evolution of the solid]. Moscow: BINOM. Laboratorija znaniy. 2009. 309 p.
  10. Tretyakov Y.D., Oleynikov N.N., Gudilin E.A., Vertegel A.A., Baranov A.N. Self-organization in physical and chemical systems to the creation of new materials. *Neorganicheskie materialy*. 1994. Vol. 30. No. 3, pp. 277–290. (In Russian).
  11. Tretyakov Y.D., Putlyaev V.I. Vvedenie v khimiyu tverdogofaznykh materialov [Introduction to the chemistry of solid-phase materials]. Moscow: MGU. 2006. 400 p.
  12. Hodakov G.S. Fizika izmel'cheniya [Grinding physics]. Moscow: Nauka. 1972. 308 p.
  13. Avvakumov E.G. Mekhanokhimicheskie metody aktivatsii khimicheskikh protsessov [Mechanochemical methods of activation of chemical processes]. Moscow: Nauka. 1991. 263 p.
  14. Bokiy G.B. Kristallokhimiya [Crystal chemistry]. Moscow: Nauka. 1971. 400 p.
  15. Belov N.V. Ocherki po strukturnoi mineralogii [Essays on structural mineralogy]. Moscow: Nedra. 1976. 344 p.
  16. Oleynikov N.N. Effect topochemical memory: the nature and role in the synthesis of solid-phase compounds and materials. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 1995. Vol. 39. No. 2, pp. 85–94. (In Russian).
  17. Radushkevich L.V. Attempts statistical description of porous media. *The main problems of the theory of physical adsorption: Proceedings of the First All-Union Conference on theoretical issues adsorption*. Moscow: Nauka. 1970, pp. 270–286.

УДК 666.973.6

В.П. ВЫЛЕГЖАНИН<sup>1</sup>, канд. техн. наук (info@stroyalata.ru);  
 Д.К.-С. БАТАЕВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, директор (kniiran@mail.ru);  
 М.А. ГАЗИЕВ<sup>3</sup>, канд. техн. наук (mgaziev56@mail.ru);  
 Г.И. ГРИНФЕЛЬД<sup>4</sup>, инженер, исполнительный директор (greenfeld@mail.ru)

<sup>1</sup> Центр ячеистых бетонов (191023, г. Санкт-Петербург, ул. Зодчего Росси, 1/3, оф. 308)

<sup>2</sup> Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН  
 (364051, Чеченская Республика, г. Грозный, Старопромисловое ш., 21 а)

<sup>3</sup> Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова  
 (364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пл. Орджоникидзе, 100)

<sup>4</sup> Национальная ассоциация производителей автоклавного газобетона (193091, Санкт-Петербург, Октябрьская наб., 40а)

## Учет влияния карбонизации при расчете длительной деформативности ячеисто-бетонных изгибаемых конструкций

Приведены теоретические и экспериментальные исследования для выявления влияния фактора естественной карбонизации (при воздействии атмосферного углекислого газа) на длительную деформативность изгибаемых железобетонных элементов из газозолобетона автоклавного твердения. Установлено, что основной причиной увеличения длительных прогибов карбонизированных изгибаемых элементов по сравнению с некарбонизированными является существенное влияние фактора карбонизации на величину ползучести бетона в сжатой зоне. Показано, что при длительном действии нагрузки для определения прогибов ячеисто-бетонных изгибаемых элементов в любой момент времени и прогнозирования их предельных значений с учетом карбонизации можно пользоваться методом профессора И.И. Улицкого на основе теории старения, если известны значения характеристик ползучести, полученные на бетонных призмах. Рекомендовано учесть влияние естественной карбонизации при расчете длительной деформативности ячеисто-бетонных изгибаемых конструкций путем принятия значения коэффициента  $\nu$ , характеризующего ползучесть бетона сжатой зоны, равным 0,1 вместо 0,2 при относительной влажности окружающей среды 40–75%.

**Ключевые слова:** автоклавный ячеистый бетон, углекислый газ, карбонизация, ползучесть, изгибаемые элементы, длительная деформативность.

V.P. VYLEGZHANIN<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (info@stroyalata.ru);

D.K.-S. BATAEV<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Director (kniiran@mail.ru);

M.A. GAZIEV<sup>3</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (mgaziev56@mail.ru);

G.I. GRINFELD<sup>4</sup>, Engineer, Executive Director (greenfeld@mail.ru)

<sup>1</sup> Center of Cellular Concretes (1/3, Off. 308 Zodchego Rossi Street, 191023 St. Petersburg, Russian Federation)

<sup>2</sup> Complex Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences (21a, Staropromyslovskoye Shosse, Grozny, Chechen Republic, Russian Federation)

<sup>3</sup> Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov (100 Ordzhonikidze Square, Grozny, Chechen Republic 364051, Russian Federation)

<sup>4</sup> National Association of Autoclave Gas Concrete Manufactures (40a, Oktyabrskaya Embankment, 193091 St. Petersburg, Russian Federation)

### Accounting of Influence of Carbonization when Calculating Long-Term Deformability of Cellular Concrete Bending Structures

Theoretical and experimental studies for revealing the factor of influence of natural carbonization (under the impact of atmospheric carbon dioxide) on the long-term deformability of bending reinforced concrete elements made of gas-ash concrete of autoclave hardening are presented. It is established that the main reason for increasing long-term deflections of carbonized bending elements comparing with non-carbonized ones is a significant influence of the carbonization factor on the value of concrete creep in the compressed zone. It is shown that in the case of the long-term loading the method of Professor I.I. Ulitsky based on the theory of aging can be used for determining deflections of cellular concrete bending elements at any moment of time and predicting their maximum values with due regard for carbonization, if the values of creep characteristics obtained on concrete prisms are known. It is recommended to take into account the influence of natural carbonization when calculating the long-term deformability of cellular concrete bending elements by adopting the value of the factor  $\nu$ , characterizing the concrete creep in the compressed zone, as equal to 0.1 instead of 0.2 at relative humidity of the environment of 40–75%.

**Keywords:** autoclave cellular concrete, carbon dioxide, carbonization, creep, bending elements, long-term deformability.

Основной причиной нарастания прогибов железобетонных изгибаемых конструкций при длительном нагружении является ползучесть бетона сжатой зоны.

Увеличение деформаций (прогибов) изгибаемых элементов из ячеистого бетона при действии длительной нагрузки вследствие ползучести бетона в сжатой зоне, по аналогии с расчетом конструкций из обычного тяжелого бетона, учитывается введением в формулу по определению кривизны ( $1/r$ ) эмпирического коэффициента  $\nu$ , характеризующего упругопластическое состояние бетона сжатой зоны [1].

Согласно существующим нормативным документам, коэффициент  $\nu$  для изгибаемых конструкций из ячеистого бетона при длительном действии нагрузки (независимо от ее величины) принимается равным при

влажности воздуха окружающей среды 40–75% – 0,2, а ниже 40% – 0,1.

По сведениям Е.С. Силаенкова [2, 3], М.А. Газиева и Ф.И. Клешева [4], при эксплуатации процесс карбонизации автоклавных ячеистых бетонов происходит не только в наружных стеновых конструкциях, но и в плитах покрытия, что, безусловно, определяет необходимость учета данного фактора (наряду с относительной влажностью окружающего воздуха) при расчете длительной деформативности ячеисто-бетонных изгибаемых конструкций.

Влияние карбонизации ячеистого бетона на величину длительных прогибов изгибаемых элементов при воздействии атмосферной углекислоты может быть учтено соответствующей корректировкой данного коэффициента.



Рис. 1. Пружинные установки для длительного испытания армированных ячеисто-бетонных балок размерами 10×16×180 см

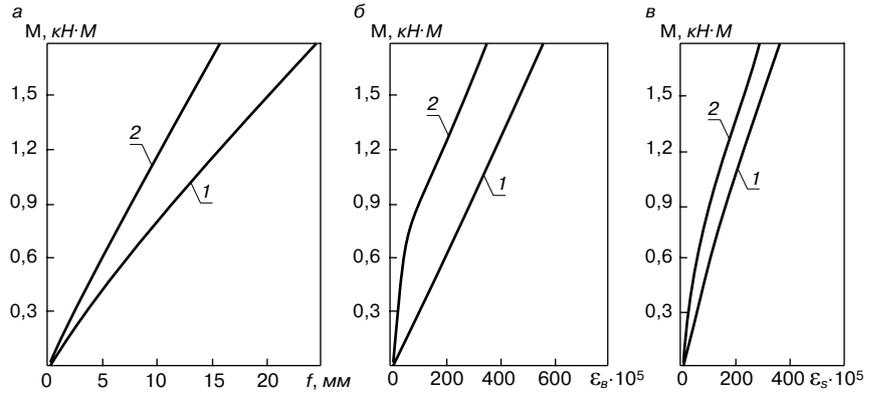


Рис. 2. Прогибы (а), относительные деформации сжатой зоны бетона (б) и растянутой арматуры (в) опытных балок при кратковременном нагружении: 1 – карбонизированные балки; 2 – некарбонизированные балки

Задачей исследований, приведенных в данной статье, являлось уточнение значения коэффициента  $\nu$  при расчете длительных прогибов изгибаемых конструкций из автоклавного ячеистого бетона (газозолобетона) с учетом фактора естественной карбонизации. Для этого были проведены длительные испытания 24 армированных изгибаемых балок, изготовленных в заводских условиях из автоклавного газозолобетона плотностью 700 кг/м<sup>3</sup>, класса В3,5, модулем упругости  $E=2500$  МПа и размерами 10×16×180 см.

Балки армировались в растянутой зоне одиночной арматурой диаметром 6 мм ( $\mu=0,177\%$ ) класса А-III с фактическим пределом текучести  $\sigma_v=497$  МПа и модулем упругости  $E_s=188 \cdot 10^3$  МПа. Расстояние от оси стержня до нижней грани балки составляло 3 см.

Одновременно с армированными балками для определения физико-механических свойств и значений характеристик ползучести газозолобетона заливались блоки размерами 40×40×16 см, из которых выпиливали кубы и призмы размерами 10×10×10 и 10×10×40 см.

Опыт проводился на двух сериях балок – некарбонизированных и карбонизированных. Карбонизация армированных балок и образцов для определения физико-механических свойств и деформаций ползучести газозолобетона осуществлялась 10%-м углекислым газом по методике [5].

Испытания газозолобетонных армированных балок на кратковременную и длительную нагрузки производилось в пружинных установках, показанных на рис. 1. Как кратковременное, так и длительное нагружение и выдерживание балок под нагрузкой осуществлялось по схеме балки на двух опорах (пролет 160 см), нагруженной двумя сосредоточенными равными силами в четвертях пролета.

При кратковременных и длительных испытаниях балок измерялись в зоне чистого изгиба деформации растянутой арматуры, бетона сжатой грани и боковой грани в различных уровнях по высоте, а также прогибы в середине пролета.

Деформации арматуры и бетона измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм соответственно на базе 350 и 200 мм, а для измерения прогиба использовались индикаторы с ценой деления 0,01 мм.

Для определения величины кратковременной разрушающей нагрузки испытывали по 6 балок из каждой серии. Средняя разрушающая нагрузка для некарбонизированных и карбонизированных балок составила соответственно 9 и 8,5 кН.

Разрушение балок произошло от достижения растянутой арматурой предела текучести, что определено по замерам деформаций арматуры. По-видимому, это послужило причиной того, что карбонизация газозолобетона мало сказалась на несущей способности балок.

Жесткость карбонизированных балок при кратковременном действии нагрузки уменьшается. Как видно из рис. 2, а, на всех этапах загрузки прогиб карбонизированных балок превышает прогиб некарбонизированных на 50–60%. Увеличение прогибов карбонизированных балок связано с ростом деформаций бетона сжатой зоны. Так, при практически равных величинах относительных деформаций растянутой арматуры  $\epsilon_s$  (разница составляет 5–10%) относительные деформации бетона крайней сжатой грани карбонизированных балок превышают те же деформации некарбонизированных балок в 1,5–3,3 раза в зависимости от величины нагрузки (рис. 2, б).

Длительное нагружение образцов производилось нагрузкой, равной 0,3 от разрушающей, определенной на некарбонизированных балках. Для чистоты эксперимента балки I и II серии (по шесть балок в каждой серии) испытывались в гидроизолированном состоянии при 10%-й влажности бетона по массе. Поэтому наблюдения за образованием и развитием трещин не проводилось.

Параллельно с нагружением балок, с учетом и без учета карбонизации для получения данных о характеристике ползучести ячеистого бетона для исследования брали по шесть газозолобетонных призм размерами 10×10×40 см. Эти призмы, так же как и балки, были гидроизолированы при влажности бетона 10% по массе и испытывались при уровне напряжения, равном 0,3 призмной прочности некарбонизированного бетона.

Длительные испытания газозолобетонных балок и призм производились в помещении, где температура в течение всего периода проведения опытов колебалась от 19 до 22°C, а относительная влажность воздуха – от 65 до 75%.

В табл. 1 приведены средние опытные значения характеристик ползучести  $\varphi(t)$  карбонизированных и некарбонизированных газозолобетонных призм.

По результатам длительных испытаний при изгибе газозолобетонных балок были построены графики изменения во времени средних относительных деформаций растянутой арматуры ( $\epsilon_{sc}$ ), бетона сжатой зоны ( $\epsilon_{bc}$ ) и высоты сжатой зоны опытных балок (рис. 3).

Как видно из рис. 3, а – средние относительные деформации сжатого бетона и растянутой арматуры для некарбонизированных балок развиваются практически с одинаковой интенсивностью.

В карбонизированных балках (рис. 3, б) средние относительные деформации растянутой арматуры растут во времени с меньшей интенсивностью, чем относительные деформации крайнего волокна сжатой зоны. Имеет место существенное увеличение высоты сжатой зоны в сравнении с некарбонизированными балками.

Таблица 1

Вид бетона	Длительность действия нагрузки, сут									
	0	3	10	30	60	90	120	150	180	240
Карбонизированный	0	0,43	0,81	1,29	1,51	1,61	1,71	1,79	1,84	
	Длительность действия нагрузки, сут									
	240	300	360	420	480	540	600	660	720	
Некарбонизированный	0	0,16	0,24	0,39	0,48	0,55	0,57	0,61	0,63	
	Длительность действия нагрузки, сут									
	240	300	360	420	480	540	600	660	720	
	0,65	0,67	0,69	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77	

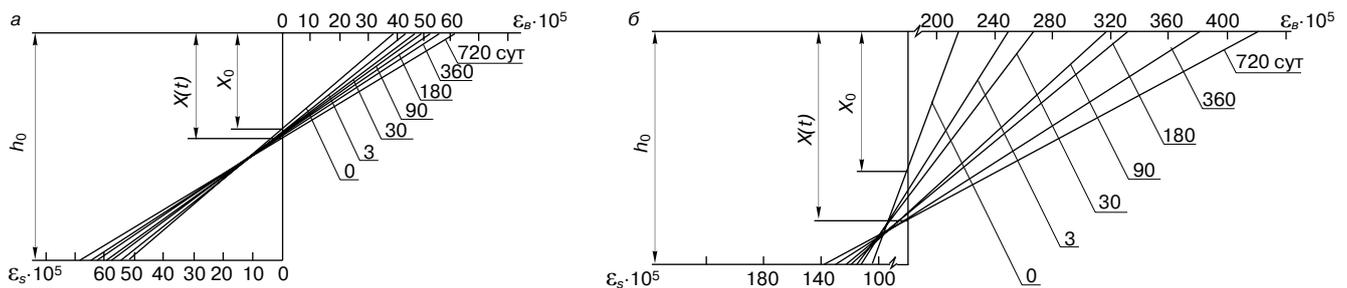


Рис. 3. Изменение во времени средних величин относительных деформаций бетона сжатой зоны  $\epsilon_{bc}$ , растянутой арматуры  $\epsilon_{sc}$  и высоты сжатой зоны балок: а – некарбонизированные балки; б – карбонизированные балки

Влияние карбонизации ячеистого бетона на величину прогибов балок в большей степени проявляется при действии длительной нагрузки (рис. 4). За 720 сут испытаний приращение прогибов для карбонизированных балок составило 6,38 мм, а для некарбонизированных – 1,17 мм (начальные точки опытных кривых на рис. 4 представляют прогибы при кратковременном действии испытательной нагрузки). Таким образом, длительные прогибы балок, карбонизированных под воздействием 10%-го углекислого газа, в 5,45 раза превышают прогибы некарбонизированных балок.

Существуют методы определения расчетных прогибов изгибаемых конструкций из тяжелых бетонов обычного твердения при длительном действии нагрузки, разработанные И.Е. Прокоповичем [6] на основе теории упругоползучего тела, а также И.И. Улицким [7] и Г.Д. Вишневецким [8] на основе теории старения. При этом в расчетных формулах этих методов жесткость или кривизна изгибаемых элементов при длительном действии нагрузки связывается с характеристикой или мерой ползучести бетона, полученными на бетонных призмах. Такой подход дает возможность использовать расчетные формулы также для определения длительных прогибов изгибаемых элементов из автоклавного ячеистого бетона с учетом фактора карбонизации.

Исследования деформирования автоклавных ячеистых бетонов под нагрузкой свидетельствуют о том, что величины пластических деформаций у этих бетонов весьма незначительны и не превышают 6–10% от величины полных деформаций даже при разрушающих нагрузках [1, 9, 10].

Аналогичные данные получены Ю.С. Коневым и В.А. Пинскером [11, 12] при кратковременных испытаниях газобетонных изгибаемых элементов. Они показали, что эпюра напряжений в сжатой зоне бетона имеет треугольное очертание вплоть до разрушения конструкций.

Исходя из этого предпочтительнее при определении длительных расчетных прогибов изгибаемых конструкций из автоклавного ячеистого бетона пользоваться методом Улицкого [7], так как в нем в отличие от методов [6] и [8] принимается треугольная эпюра напряжений в сжатой зоне бетона.

Кроме того, хотя известно, что теория старения при переменных нагрузках (когда имеются случаи разгрузок) приводит к значительным погрешностям и что в этом последнем случае лучше пользоваться теорией упругоползучего тела, при постоянных нагрузках (собственный вес и значительная постоянная нагрузка) можно использовать теорию старения.

Применение в нашем случае метода И.Е. Прокоповича [6], основанного на более сложной теории упру-

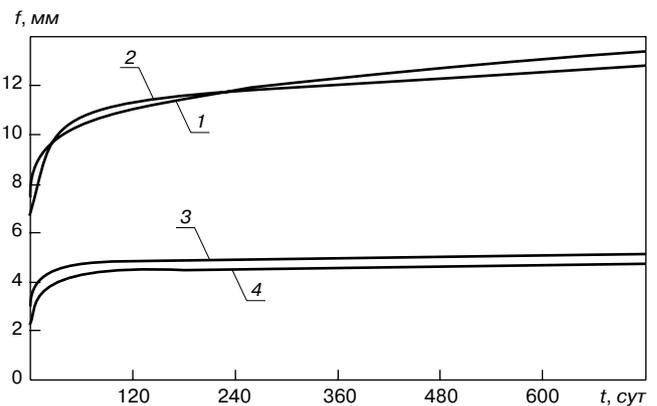


Рис. 4. Сравнение полных опытных и теоретических длительных прогибов для балок: опытные (1) и теоретические (2) кривые полных прогибов для карбонизированных балок; опытные (3) и теоретические (4) кривые полных прогибов для некарбонизированных балок; 1, 2 – соответственно опытные и теоретические кривые полных прогибов для карбонизированных балок; 3, 4 – то же для некарбонизированных балок

Таблица 2

Длительность действия нагрузки, сут	Значения прогибов в середине балки, мм					
	Карбонизированные балки			Некарбонизированные балки		
	Средние опытные	Теоретические	Отклонения, %	Средние опытные	Теоретические	Отклонения, %
0	7,08	6,3	-11,02	3,5	3,87	9,56
3	8,59	7,36	-14,44	3,79	4,12	8,01
10	9,21	8,34	-9,4	3,93	4,23	7,09
30	9,76	9,85	0,9	4,05	4,46	9,19
60	10,34	10,52	1,71	4,14	4,59	9,15
90	10,78	10,84	0,55	4,19	4,68	10,47
120	10,99	11,1	1,52	4,22	4,72	10,69
150	11,32	11,41	0,79	4,25	4,77	10,9
180	11,62	11,55	-0,6	4,28	4,8	10,83
240	11,84	11,8	-0,34	4,33	4,83	10,35
300	12,14	12,05	-0,74	4,45	4,86	8,44
360	12,4	12,21	-0,57	4,52	4,89	7,57
420	12,5	12,4	-0,8	4,57	4,93	7,3
480	12,69	12,46	-1,81	4,61	4,95	6,87
540	12,88	12,53	-2,72	4,63	4,96	6,65
600	13,24	12,64	-4,53	4,65	4,98	6,63
660	13,22	12,86	-3,45	4,66	4,99	6,61
720	13,46	12,89	-4,24	4,67	5	6,6

гоползучего тела, затруднено еще и тем, что отсутствует ряд коэффициентов, характеризующих особенности ячеистого бетона, которые входят в расчетные формулы этого метода.

В методе Улицкого [7], учитывающем изменение во времени напряжений в бетоне и арматуре, высоты сжатой зоны бетона и плеча внутренней пары, жесткости изгибаемых элементов определяются следующим образом.

Жесткость при кратковременном действии нагрузки вычисляется из выражения:

$$B_0 = \frac{E_0}{\Psi_{s,0}} A_s z_0 (h_0 - x_0), \quad (1)$$

причем  $z_0 = h_0 - 0,33x_0$ ; (2)

$$x_0 = \xi_0 h_0. \quad (3)$$

Величина  $\xi_0$  определяется по формуле:

$$\xi_0 = n_c \mu (-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{n_c \mu}}). \quad (4)$$

В формулах (1)–(4):

$$n_c = \frac{1}{\Psi_{s,0}} \alpha; \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_b}; \quad (6)$$

$$\mu = \frac{A_s}{bh_0}, \quad (7)$$

где  $A_s$  – площадь поперечного сечения растянутой арматуры;  $E_s$  – модуль упругости арматуры;  $E_b$  – модуль упругости бетона;  $b$  – ширина сжатой зоны бетона;  $h_0$  – рабочая высота поперечного сечения;  $x_0$  – высота сжатой зоны бетона в сечении с трещиной;  $\Psi_{s,0}$  – коэффициент, учитывающий влияние бетона растянутой зоны при кратковременном нагружении.

Жесткость при длительном действии нагрузки, т. е. жесткость в любой момент времени  $t$  после нагружения, определяется из выражения:

$$B(t) = \frac{E_s}{\Psi_{s,t}} A_s z(t) [h_0 - x(t)], \quad (8)$$

причем  $z(t) = h_0 - 0,33x(t)$ ; (9)

$$x(t) = \xi(t) h_0. \quad (10)$$

Величина  $\xi(t)$  определяется из уравнения:

$$C \xi^3(t) - (4C - 1) \xi^2(t) + (3C + D) \xi(t) - D = 0, \quad (11)$$

где:

$$C = \frac{n_t \mu \cdot \varphi(t)}{\xi_0 (3 - \xi_0)}; \quad (12)$$

$$D = n_t \mu [2 + \varphi(t)]; \quad (13)$$

$$n_t = \frac{1}{\Psi_{s,t}} \alpha = \frac{1}{\Psi_{s,t}} \cdot \frac{E_s}{E_b}, \quad (14)$$

где  $\Psi_{s,t}$  – коэффициент, учитывающий влияние бетона растянутой зоны при длительном действии нагрузки;  $\varphi(t)$  – характеристика ползучести бетона, полученная при испытании бетонных призм.

Пользуясь выражением (8), можно по формулам строительной механики определить величину прогиба ячеисто-бетонных элементов в любой момент времени при длительном действии нагрузки.

В табл. 2 и на рис. 4 приведено сравнение средних значений опытных прогибов с теоретическими, вычисленными по методу Улицкого.

С учетом схемы нагружения балок (балка на двух опорах, нагруженная двумя равными силами  $F$  в четвертях пролета) максимальные прогибы при кратковременном нагружении вычислялись по формуле:

$$f_0 = \frac{11}{384} \cdot \frac{F \cdot l^3}{B_0}, \quad (15)$$

где  $B_0$  – жесткость элемента при кратковременном действии нагрузки;  $l$  – расчетный пролет изгибаемого элемента;  $F$  – величина каждого из двух сосредоточенных сил, приложенных в четвертях пролета.

Максимальные значения теоретических прогибов при длительном действии нагрузки определялись по формуле:

$$f(t) = \frac{11}{384} \cdot \frac{Fl^3}{B(t)} + \frac{5}{384} \left[ \frac{ql^4}{B(t)} - \frac{ql^4}{B_0} \right], \quad (16)$$

где  $B(t)$  – жесткость элемента при длительном действии нагрузки;  $q$  – величина равномерной нагрузки от собственного веса балки.

При определении  $B(t)$  для некарбонизированных и карбонизированных балок в формулах (12) и (13) использовали опытные значения характеристик ползучести  $\varphi(t)$  газозолобетонных призм, приведенные в табл. 1.

Прогибы балок вычислялись при следующих исходных данных:

а) для некарбонизированных балок:

$b = 10$  см;  $h_0 = 13$  см;  $A_s = 0,283$  см<sup>2</sup>;

$E_s = 1,88 \cdot 10^5$  МПа;  $E_b = 2500$  МПа;  $\psi_{s,0} = \psi_{s,t} = 1$ ;

$\alpha_0 = \alpha_t = 75,2$ ;  $l = 160$  см;  $F = 1,45$  кН;  $q = 0,188$  кН/м;

б) для балок, карбонизированных 10%-м углекислым газом,  $E_b = 1000$  МПа;  $\alpha_0 = \alpha_t = 188$ ;  $q = 0,214$  кН/м (плотность бетона при карбонизации увеличивается).

Как следует из табл. 2 и рис. 4, совпадение опытных и теоретических данных по прогибам ячеистобетонных балок без учета и с учетом фактора карбонизации бетона 10%-м углекислым газом оказалось хорошим.

Так, опытные значения прогибов непосредственно после загрузки для некарбонизированных балок превышают теоретические на 11,02%, а для карбонизированных балок меньше теоретических на 9,56%. Наибольшее отклонение между опытными прогибами при длительном нагружении и теоретическими значениями прогибов для некарбонизированных и карбонизированных балок составило соответственно 10,9 и 14,44%.

Таким образом, прогибы армированных балок при длительном действии нагрузки, вычисленные по методу Улицкого с использованием опытных значений характеристик ползучести ячеистого бетона, без и с учетом его карбонизации под воздействием 10%-го углекислого газа, полученных на бетонных призмах размерами  $10 \times 10 \times 40$  см, хорошо согласуются с опытными значениями прогибов некарбонизированных и карбонизированных армированных балок. Это свидетельствует о том, что можно пользоваться расчетными формулами Улицкого для определения предельных прогибов ячеисто-бетонных армированных балок с учетом их естественной карбонизации, если известны предельные значения характеристик ползучести ячеистого бетона, полученные на бетонных призмах.

На базе нормативных значений предельной меры ползучести автоклавных ячеистых бетонов, рекомендованных проф. С.В. Александровским [13] для использования при расчете длительных деформаций ячеистобетонных конструкций, а также на основе ранее полученных авторами экспериментальных данных по исследованию деформации ползучести автоклавного газозолобетона при длительности наблюдения более 2000 сут были получены предельные значения характеристик ползучести  $\varphi(\infty)$  для газозолобетона класса В3,5 без учета и с учетом фактора естественной карбонизации, которые оказались равными 1,6 и 3,8 соответственно.

С учетом этих предельных значений характеристик ползучести определим по формулам (12) и (13) коэффициенты  $C$  и  $D$ , а затем по формуле (8) – предельные значения жесткостей балок.

Предельно возможные значения полных прогибов балок при длительной нагрузке без и с учетом их естественной карбонизации, вычисленные по формуле (16),

получились равными соответственно 0,65 и 1,12 см. Значения кривизны ( $1/r$ ), соответствующие этим прогибам, определяли из известной формулы:

$$f_m = m_f \left( \frac{1}{r} \right) l^2, \quad (17)$$

где  $m_f$  – коэффициент, зависящий от характера нагружения.

Вычисленные по формуле (17) предельные значения кривизны для некарбонизированных балок и балок, карбонизированных углекислотой атмосферной концентрации, равны  $22,07 \cdot 10^{-5}$  и  $37,9 \cdot 10^{-5}$  соответственно.

Из формулы (8.142) СП 63.13330.2012 (Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003) для определения величины кривизны железобетонных элементов на участках с трещинами в растянутой зоне находим соответствующие этим величинам значения коэффициента  $\nu$ . При этом призмная прочность  $R_b$  и модуль упругости  $E_b$  для газозолобетона плотностью  $700$  кг/м<sup>3</sup>, карбонизированного атмосферной углекислотой, согласно проведенным опытам, принимались соответственно равными 3,4 и 1920 МПа. Расчеты показали, что значение коэффициента  $\nu$  для некарбонизированных балок равно 0,19, а для балок, карбонизированных атмосферной углекислотой, – 0,1.

Прогибы в опытах определяли на балках при влажности газозолобетона, равной 10 мас. %. Эта влажность соответствовала условиям эксплуатации изгибаемых ячеисто-бетонных конструкций при относительной влажности воздуха окружающей среды выше 40%.

Таким образом, полученные значения коэффициента  $\nu$ , учитывающего влияние ползучести ячеистого бетона на длительные деформации изгибаемых элементов, для некарбонизированных армированных балок из газозолобетона незначительно (в пределах 5%) отличаются от численного значения  $\nu$ , равного 0,2, рекомендуемого в нормативных документах, при влажности воздуха окружающей среды 40–75%. Что же касается газозолобетонных армированных балок, карбонизированных атмосферной углекислотой, то для них величина  $\nu$  составляет 0,1.

#### Выводы.

На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований по изучению влияния фактора карбонизации на длительную деформативность изгибаемых железобетонных элементов из автоклавного ячеистого бетона могут быть сделаны следующие выводы.

1. При длительном действии нагрузки в некарбонизированных ячеисто-бетонных изгибаемых элементах средние значения относительных деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры развиваются с одинаковой интенсивностью. В то же время в карбонизированных изгибаемых элементах средние относительные деформации крайнего волокна сжатой зоны растут во времени с большей интенсивностью, чем деформации растянутой арматуры. Имеет место существенное увеличение высоты сжатой зоны в сравнении с некарбонизированными элементами. Это свидетельствует о том, что в карбонизированных изгибаемых элементах увеличение длительного прогиба связано в основном с большей ползучестью ячеистого бетона сжатой зоны.

2. Влияние карбонизации автоклавного ячеистого бетона на величину прогибов балок в большей степени проявляется при действии длительной нагрузки. За 720 сут испытаний приращение прогибов для карбонизированных балок составило 6,38 мм, а для некарбонизированных балок – 1,17 мм.

3. Опытные значения прогибов ячеисто-бетонных изгибаемых элементов (в момент загрузки и в после-

дующие сроки после загрузки) с учетом и без учета фактора карбонизации хорошо согласуются с расчетными прогибами, вычисленными в предположении треугольной эпюры напряжения в сжатой зоне по методу, предложенному И.И. Улицким.

4. В целях повышения долговечности изгибаемых ячеисто-бетонных конструкций рекомендуется учесть влияние фактора естественной карбонизации при расчете длительной деформативности путем принятия значения коэффициента  $\nu$ , характеризующего упругопластическое состояние (ползучесть) бетона сжатой зоны, равным 0,1 вместо 0,2, при относительной влажности окружающей среды 40–75%.

5. При проектировании изгибаемых конструкций из автоклавного ячеистого бетона необходимо учитывать возможное увеличение их деформаций в процессе эксплуатации от воздействия естественной карбонизации, снизить которые можно путем дополнительного армирования сжатой зоны изгибаемого элемента или же за счет использования преднапряженного армирования в растянутой зоне.

### Список литературы

1. Макаричев В.В., Милейковская К.М. Исследование армированных конструкций из ячеистых бетонов. М.: Госстройиздат, 1963. 99 с.
2. Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
3. Силаенков Е.С., Батаев Д.К.-С., Мажиев Х.Н., Газиев М.А. Повышение долговечности конструкций и изделий из мелкозернистых ячеистых бетонов при эксплуатационных воздействиях. Грозный: [б.и.], 2015. 355 с.
4. Газиев М.А., Клешев Ф.И. Опыт длительной эксплуатации совмещенных покрытий из ячеисто-бетонных плит в городе Свердловске. В кн.: Производство и применение ячеистых бетонов в жилищно-гражданском строительстве. Л. 1986. С. 56–59.
5. Газиев М.А. Методика определения деформаций ползучести автоклавных ячеистых бетонов с учетом их старения от действия углекислого газа. В кн.: Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. Таллин, 1984. Ч. I. С. 167–169.
6. Прокопович И.Е., Зедгендзе В.А. Прикладная теория ползучести. М.: Стройиздат, 1980. 210 с.
7. Улицкий И.И. Теория и расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом длительных процессов. Киев: Будівельник, 1967. 346 с.
8. Вишневецкий Г.Д. Основы расчета элементов конструкций на ползучесть. Л.: ЛИСИ, 1980. 82 с.
9. Калнайс А.А., Тетерс Г.А., Шкербелис К.К. Исследование прочности и деформативности конструктивного газобетона. В кн.: Исследования по бетону и железобетону. Рига, 1959. Вып. 4. С. 243–261.
10. Макаричев В.В., Трамбовецкий В.П. К вопросу о прочности ячеистого бетона. В кн.: Ячеистые бетоны. Л., 1968. Вып. 1. С. 43–52.
11. Конеv Ю.С., Пинскер В.А. Деформативные особенности газобетонных изгибаемых элементов при кратковременном нагружении. В кн.: Ячеистые бетоны. Л., 1971. Вып. 4. С. 46–49.
12. Конеv Ю.С. Исследование деформативных свойств изгибаемых конструкций из газобетона. Дисс... канд. техн. наук. Л. 1972. 23 с.
13. Александровский С.В. Нормирование ползучести ячеистых бетонов. В кн.: Индустриальные конструкции из ячеистых бетонов и технология их изготовления. М.: НИИЖБ, 1979. С. 130–141.

### References

1. Makarichev V.V., Mileikovskaya K.M. Issledovanie armirovannykh konstruksii iz yacheistyx betonov [The study reinforced structures of cellular concrete]. Moscow: Gosstroyizdat. 1963. 99 p.
2. Silaenkov E.S. Dolgovechnost' izdelii iz yacheistyx betonov [Durability of products from cellular concrete]. Moscow: Stroyizdat. 1986. 176 p.
3. Silaenkov E.S., Bataev D.K.-S., Mazhiev Kh.N., Gaziev M.A. Povyshenie dolgovechnosti konstruksii i izdelii iz melkozernistyx yacheistyx betonov pri ekspluatatsionnykh vozdeistviyakh [Increasing the durability of structures and products from fine-grained porous concrete with performance impacts]. Grozny. 2015. 355 p.
4. Gaziev M.A., Kleshchev F.I. Opyt dlitel' noi ekspluatatsii sovmeshchennykh pokrytii iz yacheistobetonnykh plit v gorode Sverdlovsk. V kn.: Proizvodstvo i primenenie yacheistyx betonov v zhilishchno-grazhdanskom stroitel'stve [Experience of prolonged use of combined coatings of porous concrete slabs in the city of Sverdlovsk. In the book: The production and use of cellular concrete in housing and civil construction]. Leningrad. 1986, pp. 56–59.
5. Gaziev M.A. Metodika opredeleniya deformatsii polzuchesti avtoklavnykh yacheistyx betonov s uchetom ikh stareniya ot deistviya uglekislogo gaza. V kn.: Dolgovechnost' konstruksii iz avtoklavnykh betonov [Method for determining creep strain autoclaved aerated concrete in view of their aging from the effects of carbon dioxide. In the book: The durability of structures made of autoclaved concrete]. Tallin. 1984. Part I, pp. 167–169.
6. Prokopovich I.E., Zedgenidze V.A. Prikladnaya teoriya polzuchesti [Applied theory of creep]. Moscow: Stroyizdat. 1980. 210 p.
7. Ulitskiy I.I. Teoriya i raschet zhelezobetonnykh stержnevyykh konstruksii s uchetom dlitel'nykh protsessov [Theory and calculation of reinforced concrete beam structures, taking into account long-term processes]. Kiev: Budivel'nik. 1967. 346 p.
8. Vishnevetskii G.D. Osnovy rascheta elementov konstruksii na polzuchest' [Bases for design of structural elements creep]. Leningrad: LISI. 1980. 82 p.
9. Kalnais A.A., Teters G.A., Shkerbelis K.K. Issledovanie prochnosti i deformativnosti konstruktivnogo gazobetona. V kn.: Issledovaniya po betonu i zhelezobetonu [Investigation of strength and deformability constructive aerated. In the book: Studies on concrete and reinforced concrete]. Riga. 1959. Vol. 4, pp. 243–261.
10. Makarichev V.V., Trambovetskii V.P. K voprosu o prochnosti yacheistogo betona. V kn.: Yacheistye betony [On the issue of cellular concrete strength. In the book: Cellular concrete]. Leningrad. 1968. Vol. 1, pp. 43–52.
11. Konev Yu.S., Pinsker V.A. Deformativnye osobennosti gazobetonnykh izgibaemykh elementov pri kratkovremennom nagruzhении. V kn.: Yacheistye betony [Deformability especially aerated concrete bent elements with short-term loading. In the book: Cellular concrete]. Leningrad. 1971. Vol. 4, pp. 46–49.
12. Konev Yu.S. The study of deformation properties of flexible structures made of aerated concrete. Cand. Diss. (Engineering). Leningrad. 1972. 23 p.
13. Aleksandrovskiy S.V. Normirovanie polzuchesti yacheistyx betonov. V kn.: Industrial' nye konstruksii iz yacheistyx betonov i tekhnologiya ikh izgotovleniya [Rationing creep of cellular concrete. In the book: The industrial structure of cellular concrete and the technology of their production]. Moscow: NIIZhB. 1979, pp. 130–141.

УДК 691.327.973:661.185.7

В.Д. ЧЕРКАСОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН (vd-cherkasov@yandex.ru),  
 В.И. БУЗУЛУКОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук; Ю.М. БАЖЕНОВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, академик РААСН (tvvib@mgsu.ru)

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва  
 (430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, 68)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
 (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

## Пенообразователи из белков микробного синтеза для производства ячеистых бетонов

Рассматривается проблема получения ключевого компонента производства пенобетонов – пенообразователя. Предлагаются два подхода к ее решению. Первый – это использование мицелиальных отходов биохимической промышленности, содержащих в большом количестве белки микробного синтеза. В качестве мицелиальных отходов применяются отходы производства антибиотиков. Второй путь – синтез белков с помощью микроорганизмов на отходах пищевой промышленности. Такими отходами являются творожная и подсырная сыворотки, послеспиртовая барда. Для обогащения этих отходов белком были выбраны микроорганизмы и разработаны условия их культивирования на отходах. Основу пенообразователя составляет гидролизат белка микробного синтеза. Показаны условия гидролиза белков. Исследованы свойства пенообразователей. Кратность пены из этих пенообразователей составляет 18–23, а водоотделение за один час – 0%, коэффициент стойкости пены в цементном растворе 0,9–0,92. По качеству разработанные пенообразователи не уступают существующим аналогам, но дешевле. Разработаны составы пенобетонов на основе этих пенообразователей и исследованы их свойства. Установлено, что пенобетоны на основе полученных пенообразователей по своим свойствам не уступают пенобетонам, полученным на основе пенообразователя «Пеностром».

**Ключевые слова:** пенообразователь, микробный белок, гидролиз, пенобетон.

V.D. CHERKASOV<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Corresponding member of RAACS (vd-cherkasov@yandex.ru),

V.I. BUZULUKOV<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering); Yu.M. BAZHENOV<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS (tvvib@mgsu.ru)

<sup>1</sup> N.P. Ogarev Mordovia State University (68, Bolshevistskaya Street, Saransk, 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation)

<sup>2</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Foaming Agents from Proteins of Microbial Synthesis for Manufacturing Cellular Concretes

The problem of receiving the key component of foam concretes production – a foaming agent – is considered. Two approaches to its solution are proposed. The first one is the use of mycelial waste of the bio-chemical industry containing large amounts of proteins of a microbic synthesis. Waste of antibiotics production is used as mycelia waste. The second one is a synthesis of proteins with the help of microorganisms on the food industry waste. These wastes are curd and cheese whey, distillery stillage. For enrichment of these wastes with proteins, microorganisms were selected and conditions of their cultivation on wastes were developed. The base of the foaming agent is a protein hydrolysate of microbic synthesis. Conditions of the protein hydrolysis are shown. Properties of foaming agents have been studied. Foam expansion ratio of these foaming agents is 18–23, water segregation per an hour – 0%, the foam stability factor in the cement mortar – 0.9–0.92. The quality of the developed foaming agents is not inferior to the existing analogues, but cheaper. Compositions of foam concretes on the basis of these foaming agents have been developed, and their properties have been investigated. It is established that qualities of foam concretes on the basis of foaming agents obtained are not inferior to foam concretes produced on the basis of the foaming agent “Penostrom”.

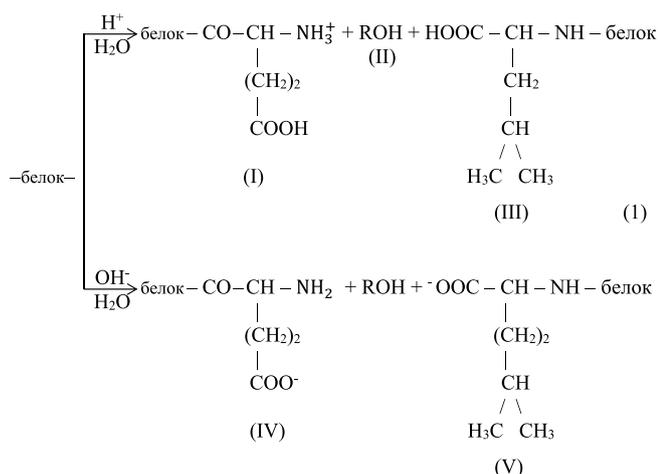
**Keywords:** foaming agent, microbic protein, hydrolysis, foam concrete.

Проблема снижения теплотерь в зданиях потребовала создания эффективных теплоизоляционных материалов. Перспективными с этой точки зрения являются безавтоклавные ячеистые бетоны. Важнейшим компонентом в производстве пенобетонов является пенообразователь. В настоящее время используются преимущественно синтетические пенообразователи, которые не обеспечивают получения устойчивой пеномассы, отрицательно влияют на прочность пенобетона, не позволяют получить пенобетоны низкой плотности, экологически опасны. Наиболее перспективными с этой точки зрения являются белковые пенообразователи. Однако из-за отсутствия достаточной сырьевой базы и высокой энергоёмкости производства они не нашли широкого распространения. Повышенный интерес к пенобетонам потребовал создания нового типа пенообразователя с более высокими функциональными возможностями и на доступном сырье.

Доступным сырьем для производства пенообразователя, по мнению авторов, могут быть белки микробного синтеза. Источником белка микробного синтеза служат прежде всего многотоннажные отходы биохимической промышленности, содержащие в значительном количестве мицелий микроорганизмов. Второй

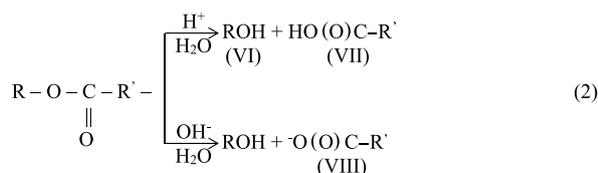
путь получения протеинсодержащих продуктов – это их синтез с помощью микроорганизмов на отходах пищевой промышленности. Основу пенообразователя нового поколения составляет гидролизат белка микробного синтеза.

В процессе гидролиза благодаря разрыву слабых связей в макромолекуле белки будут распадаться как на отдельные фрагменты (полипептиды различного строения), так и на составляющие аминокислоты. При этом будет разрушаться и нативная структура белка. До аминокислот белки гидролизуются обычно в довольно жестких условиях, например при кипячении с 70% соляной или 35% серной кислотой. В относительно мягких условиях гидролиз белков будет осуществляться в основном на отдельные фрагменты и частично на аминокислоты. В большей степени будут гидролизироваться сложноэфирные связи в боковых цепях макромолекул белка и в меньшей – с разрывом пептидной связи. В результате часть гидролизованных белков в виде водорастворимых солей будет переходить в раствор. Катализируемый кислотами или основаниями гидролиз фрагмента белка, образованного, например, глутаминовой кислотой и лейцином, можно представить в виде следующей формулы:



То есть при гидролизе белков в присутствии щелочей будут образовываться растворы преимущественно анионоактивных ПАВ, а в присутствии кислот – катионоактивных.

Гидролиз жиров (глицеридов), присутствующих в небольших количествах в мицелиальных отходах, будет идти по известным направлениям:



где R – остаток глицерида; R' – алифатический остаток жирной кислоты.

В ходе щелочного гидролиза белковых субстратов и жиров образуются вещества (IV), (V) и (VIII), т. е. в основном анионоактивные ПАВ, у которых воздуховлекающие и пенообразующие свойства будут преобладающими [1]. Таким образом, меняя природу катализатора, а также условия реакции расщепления, можно в определенной степени управлять свойствами получаемых поверхностно-активных веществ.

При производстве антибиотиков, например пенициллина, образуются многотоннажные мицелиальные отходы, представляющие собой в основном мицеллий микроорганизмов. Содержание белка в них достигает 37%, жира – 4,2%, небольшого количества лецитина (состоящего из остатков глицерина, жирных кислот, холина) и 0,4–0,8% сахаров [2].

Получение пенообразователя из этого сырья производится щелочным гидролизом [3]. В качестве щелочного компонента при гидролизе мицелия используется гидроксид кальция или гидроксид натрия. При выборе основания для гидролиза учтены следующие факторы: известь значительно дешевле гидроксида натрия, работа с ней менее опасна; в силу малой растворимости извести в воде (0,17 г на 100 г раствора при 20°C) ее концентрация поддерживается постоянной; нейтрализовать избыток извести в полученном гидролизате не обязательно из-за малой концентрации. С учетом указанных факторов разработка пенообразователя из мицелиальных отходов проведена с использованием гидроксида кальция. Проведенные исследования показали, что эффективность конечного продукта зависит от температуры, продолжительности гидролиза и соотношения исходных компонентов. Максимальный объем пены с минимальным водоотделением получен при температуре гидролиза 97°C и продолжительности гидролиза не менее двух часов.

Таблица 1

Показатель	Значение
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1035–1045
Содержание сухих веществ, %	8–10
Водородный показатель (рН)	9–9,2
Температура замерзания, °С	-3
Кратность пены, полученной из 2% раствора гидролизата	20–23
Водоотделение из пены за 1 ч, % (использован 2% раствор гидролизата)	0

Влияние щелочного компонента на качество пенообразователя довольно велико. Повышение устойчивости пены наблюдается при достижении соотношения исходных компонентов – мицелия и извести – 7:1. На основании проведенных исследований рекомендованы следующие оптимальные соотношения компонентов: вода:мицелий:известь (по массе) – 40:7:1.

Основные физико-химические свойства полученного раствора белкового пенообразователя при 22°C представлены в табл. 1.

Кроме мицелия в качестве белоксодержащего сырья для производства пенообразователя строительного назначения могут быть использованы отходы пищевой промышленности после их микробиологической обработки. Это молочная сыворотка после получения творога или сыра из молока.

Молочная сыворотка является побочным продуктом при производстве сыров, творога, молочно-белковых концентратов и относится к вторичным сырьевым ресурсам молочного комплекса АПК. В настоящее время молочная сыворотка не всегда подвергается дальнейшей переработке и, по свидетельству Международной молочной федерации, до 50% ее сливается в канализацию [4]. Состав и свойства молочной сыворотки зависят от вида основного продукта, особенностей технологии ее получения, а также от аппаратного оформления процесса. Содержание сухих веществ в сыворотке составляет 4–7%, а на долю белковых веществ приходится около 1%. Пенообразующая способность сыворотки невелика и обусловлена в основном содержанием в ней белковых веществ. Логично предположить, что повышение содержания этих веществ в сыворотке позволит улучшить качество получаемой пены. Повысить массу белковых веществ в сыворотке возможно при переработке молочной сыворотки с применением биотехнологии. Как известно, в основе получения продуктов путем биотехнологии лежат или анаэробные процессы (брожение), или процессы окислительные. В первом случае мы имеем дело с продуктами энергетического распада лактозы (кислоты, спирты), во втором – с процессами интенсивного нарастания клеточного материала и синтезом микроорганизмом-продуцентом сложных органических соединений (белки, жиры, витамины и т. д.) [4]. В процессе обработки вторым способом происходит нарастание биомассы, а поскольку тела микроорганизмов в основном состоят из белков, то и содержание белковых веществ в сыворотке повысится. Помимо белковых веществ, в сыворотке содержится большое количество лактозы. Обладая слабой поверхностной активностью, лактоза и ее производные не вносят существенного вклада в пенообразующие свойства сыворотки и гидролизата, поэтому остаются фактически неиспользованными. Наряду с этим лактоза может выступать в качестве питательного компонента для сбраживающих сыворотку микроорганизмов с последующим преобразованием лактозы в вещества белковой природы.

Таблица 2

Свойство	Продолжительность брожения, сут						
	0	7	14	22	29	36	43
Содержание сухих веществ, г/л	63	60,3	56,6	50,9	30,8	28,2	26,7
Массовая доля белковых веществ в сухих веществах, %	16,3	16,8	19,5	22,3	31,8	41,7	53,3
Массовая доля лактозы в сухих веществах, %	83,7	83,2	80,2	77,7	68,2	58,4	46,7
Кратность пены, полученной из 2% раствора гидролизата (рН=8,5)	8	10	12	15	20	10	8
Водоотделение из пены, полученной из 2% раствора гидролизата (рН=8,5)	10	7	6	0	0	0	0

Таблица 3

Свойство	Продолжительность брожения, сут						
	0	7	14	22	29	36	43
Содержание сухих веществ, г/л	62	57,5	56,6	55	45	37,6	33,2
Массовая доля белковых веществ в сухих веществах, %	22,8	18	18,5	19,3	22,4	27,4	35,2
Массовая доля лактозы в сухих веществах, %	77,2	81,8	81,2	80,9	77,6	72,6	64,8
Кратность пены, полученной из 2% раствора гидролизата (рН=8,5)	10	10	11	12	16	21	17
Водоотделение из пены, полученной из 2% раствора гидролизата (рН=8,5)	15	13	12	10	0	0	0

В подсырной и творожной сыворотке, в зависимости от степени использования компонентов молока в основном продукте, содержание сухих веществ составляло от 4 до 6%, а белковых веществ – колебалось в пределах 0,7–1%. Изучение пенообразующих свойств щелочных и кислотных гидролизатов сыворотки показало, что растворы щелочных гидролизатов имели более высокие показатели кратности и устойчивости полученной пены. В качестве катализаторов процесса гидролиза были испытаны такие основания, как гидроксиды калия, натрия и кальция. Установлено, что гидролизат, полученный при использовании гидроксида натрия, имел лучшие поверхностно-активные свойства. Выявлены следующие оптимальные условия гидролиза сыворотки: весовое соотношение гидроксид натрия: сухие вещества в сыворотке – 1:2, продолжительность гидролиза – 50 мин при температуре среды 95°C. В качестве стабилизатора пены использован раствор сульфата железа (II). Полученная пена имела кратность, равную 8–10, водоотделение – около 10–15%. Водоотделение пены определялось по количеству жидкости, выделившейся из пены в течение одного часа (в процентах к исходному количеству взятого для испытания раствора пенообразователя). Избыток щелочи в гидролизате нейтрализовали серной кислотой, доводя рН среды до 8,5.

Как предположено ранее, повышение белковой массы в сыворотке, например микробиологическим путем, улучшит пенообразующие свойства получаемого пенообразователя. Наиболее простой путь реализации данной идеи – это проведение самосквашивания молочной сыворотки. Для изучения динамики пенообразующих свойств сыворотки в ходе самосквашивания были выбраны подсырная и творожная сыворотки, которые были подвержены брожению микрофлорой, внесенной в момент ее получения. Процесс осуществлялся при 25°C. Сравнивались два пути брожения сыворотки: анаэробное и окислительное. Анаэробный процесс прово-

дился в закрытых емкостях с периодическим сбросом образующихся газообразных продуктов. Окислительное брожение проводилось в открытых емкостях при барботировании воздуха через раствор. Поскольку пенообразующие свойства сыворотки в первом методе самосквашивания оказались немного выше, чем во втором, в дальнейшем брожение сыворотки проводилось только путем анаэробного брожения. Динамика основных свойств гидролизата сыворотки в ходе брожения представлена в табл. 2 (творожная сыворотка) и табл. 3 (подсырная сыворотка).

Увеличение массовой доли белковых веществ и уменьшение массовой доли лактозы в сухих веществах в ходе брожения сыворотки до определенного времени могут свидетельствовать о частичной переработке лактозы микроорганизмами в белковую массу. Изменение состава сыворотки по мере брожения влечет за собой изменение свойств самой сыворотки и ее гидролизата.

Наиболее оптимальным можно считать следующую продолжительность самосквашивания сыворотки в выбранных условиях: творожная сыворотка – 29–30 сут, а подсырная – 36–38 сут.

Разницу в оптимальных сроках брожения можно объяснить тем, что при производстве творога происходит более интенсивный гидролиз белков, чем при производстве сыра, поэтому творожная сыворотка на начальном этапе уже частично гидролизована. С целью сокращения продолжительности брожения и дальнейшего повышения качества получаемой пены было проведено сбраживание творожной сыворотки в присутствии таких микроорганизмов, как *Candida utilis*, *Penicillium chrysogenum*, *Xanthomonas campestris*, *Saccharomyces cerevisiae* (дрожжи пекарские). Исследования показали, что кратность и стойкость пены раствора гидролизата сыворотки в ходе брожения возрастали и достигали максимального значения примерно на 3-и – 4-е сут, независимо от вида использованного микроорганизма, а за-

Таблица 4

Свойство	Продолжительность брожения молочной сыворотки в присутствии <i>Candida utilis</i> , сут									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кратность 2% раствора гидролизата (рН=8,5)	14,1	16,4	18,5	16,7	14,5	12,4	9,5	8,2	7,4	7,1
Водоотделение 2% раствора гидролизата (рН=8,5)	8,7	6,5	4,4	2,5	0	0	0	3	8	16

тем уменьшались. Наиболее хорошие пенообразующие свойства показал гидролизат сыворотки, сбраживание которой производилось в присутствии *Candida utilis* при 27°C. Использование данного микроорганизма позволило сократить процесс сбраживания сыворотки до трех суток без ухудшения пенообразующих свойств гидролизата. Свойства гидролизата подсырной сыворотки после ее брожения представлены в табл. 4. Таким образом, путем использования биотехнологий можно получить эффективный пенообразователь для пенобетонов из отходов молочной промышленности [5].

Следующим источником протеинов для переработки в пенообразователь строительного назначения предлагается использовать вторичный продукт промышленного производства этилового спирта – послеспиртовую барду.

Послеспиртовая барда (ПСБ) выпускается в виде жидкой барды (ТУ-9296-249-00008064–98) и сухой барды (ГОСТ Р53098–2008). Ежегодно на предприятиях спиртовой отрасли России в виде отходов образуется около 10 млн т жидкой барды [6], часть которой используется преимущественно зимой, в качестве корма для крупного рогатого скота, а в летний период в основном сбрасывается в реки и овраги или в пруды-накопители, нанося этим огромный вред окружающей среде [7]. В то же время спиртовая барда содержит протеинов около 27% от массы сухих веществ, которые могут послужить исходным сырьем для получения поверхностно-активных веществ строительного назначения. Состав барды существенно зависит от исходного сырья. Так, содержание сухих веществ в жидкой зерновой барде составляет 7–8%; картофельной – 5%; меласной – 7,5–10% [8]. Сухие вещества барды состоят из белков, целлюлозы, декстринов, жира, минеральных и других веществ. Благодаря азотистым веществам дрожжей, использованных для сбраживания, содержание белков в сухом веществе барды примерно в два раза выше, чем в исходном зерновом сырье.

В спиртовой промышленности ПСБ поставляют потребителям как в виде водной суспензии, так и в виде сухого порошка. В связи с этим было проведено выявление наиболее оптимальных условий получения пенообразователя как из жидкой, так и из сухой ПСБ. Варьировались такие параметры, как температура, продолжительность процесса гидролиза, содержание сухих веществ в водной суспензии и количество гидролизующего компонента. В качестве щелочного компонента были испытаны гидроксиды калия, натрия и кальция.

В результате исследований были установлены следующие наиболее оптимальные соотношения компонентов и условия получения пенообразователя:

а) вода:ПСБ (жидкое):гидроксид натрия (по массе) – 100:6,4:2,6;

б) вода:ПСБ (сухое):гидроксид натрия (по массе) – 100:10:1,8.

Продолжительность гидролиза – 160 мин при температуре среды 93–95°C. Остаток щелочи в гидролизате нейтрализовали серной кислотой, доводя рН среды до 8 ед. Выбор серной кислоты обусловлен тем, что образующийся при этом сульфат натрия, как известно, является ускорителем схватывания цементных систем, в то время как соли других кислот в основном негативно влияют на свойства конечной продукции. Содержание сухих веществ в гидролизате (по массе) составило: при использовании сухой ПСБ – 7,5%; при использовании жидкой ПСБ – 7,1%. В качестве стабилизатора пены был использован раствор сульфата железа (II). Полученный таким образом пенообразователь, разбавленный водой до трехпроцентной концентрации (по сухому веществу), имел кратность 14 ед., водоотделение 0%. Однократное

**Таблица 5**

Свойство	Значение
Плотность раствора при 20°C, г/см <sup>3</sup>	1,06–1,08
Массовая доля сухих веществ, %	9,8–10
Массовая доля белковых веществ в сухих веществах, %	24–25
рН раствора	7,5–8,5
Кратность пены, полученной из 2% раствора гидролизата	18–21
Водоотделение из пены за 1 ч, полученной из 2% раствора гидролизата, %	0

замораживание-размораживание раствора данного гидролизата не оказывает влияния на его пенообразующие свойства и качество получаемой пены [9].

Сравнение пенообразующих свойств гидролизатов, полученных из сухой и жидкой ПСБ, показало, что они обладают практически одинаковыми свойствами при равных концентрациях растворов. При получении пенообразователя, с экономической точки зрения, предпочтительнее использовать дешевую жидкую ПСБ. С целью повышения содержания белковых веществ в ПСБ предлагается ее биообработка микроорганизмами. Наиболее эффективным продуцентом биомассы на послеспиртовой барде является штамм *Geotrichum candidum* 3С-106. Культивирование этого штамма производилось на среде, содержащей 6% послеспиртовой барды в пересчете на сухое вещество и 0,4% нитрата натрия, в течение 5–6 сут при температуре 26–28°C, интенсивности перемешивания 150 об./мин и рН среды 4,5–7. При этом содержание биомассы возрастало в пять раз. Из культуральной жидкости путем гидролиза получен пенообразователь. Гидролиз культуральной жидкости проводится 4% раствором гидроксида натрия при температуре 93°C в течение 2 ч. Разработанный пенообразователь имел следующие физико-химические свойства (табл. 5).

Было установлено, что в результате удаления воды из растворов вышерассмотренных белковых пенообразователей путем выпаривания образуется твердый концентрат, хорошо растворимый в воде. Пенообразующие свойства водных растворов такого концентрата оказались несколько выше, чем для растворов до выпаривания воды. При этом твердый концентрат не терял пенообразующих свойств при хранении в течение наблюдаемых двух лет.

Следует отметить, что для всех вышерассмотренных пенообразователей минимальное значение концентрации раствора, при которой достигаются максимальная устойчивость пены, минимальное водоотделение из пены и высокая кратность, оказалось примерно одинаковым и равным 2–2,5 мас. %.

Важным свойством пены является ее стойкость в цементном растворе. Коэффициент стойкости разработанных пен в цементном растворе оказался равным 0,9–0,92, т. е. качество пены хорошее. На основе этих пенообразователей были разработаны составы неавтоклавных пенобетонов плотностью 300, 500, 700 кг/м<sup>3</sup>, прочность которых при сжатии соответственно равна 0,5–0,8, 1,3–1,5 и 3–3,5 МПа.

Проведенные опыты по влиянию полученных пенообразователей и известной добавки «Пеностром» на прочность пенобетона при сжатии плотностью 800 кг/м<sup>3</sup> показали идентичные результаты.

Таким образом, на основании вышеизложенных результатов можно заключить, что из отходов микробиологической и пищевой промышленности с применени-

ем биотехнологии можно получать высококачественные пенообразователи с низкой стоимостью, не уступающие по качеству существующим аналогам.

#### Список литературы

1. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1983. 263 с.
2. Беккер З.Э. Физиология и биохимия. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1986. 227 с.
3. Бузулуков В.И., Черкасов В.Д., Емельянов А.И., Сыркина Н.П., Гарцева С.О. Белковый преобразователь для пенобетонов // *Известия вузов. Строительство*. 2013. № 7. С. 23–27.
4. Залашко М.В. Биотехнология переработки молочной сыворотки. М.: Агропромиздат, 1990. 192 с.
5. Яровенко В.Л. Технология спирта. М.: Колос, 2002. 465 с.
6. Патент РФ 2141930. *Способ приготовления белкового пенообразователя* / Соломатов В.И., Черкасов В.Д., Бузулуков В.И. Заявл. 21.04.1998. Опубл. 27.11.1999. Бюл. № 21.
7. Патент РФ 2162070. *Пенообразователь* / Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Киселев Е.В., Грошев В.М. Заявл. 18.08.1999. Опубл. 20.01.2001. Бюл. № 2.
8. Комаров В.И., Лебедев Е.И., Мануйлова Т.А. Проблема использования вторичных ресурсов отрасли пищевой и перерабатывающей промышленности и их влияние на окружающую среду // *Пищевая промышленность*. 1998. № 2. С. 9–12.
9. Ненайденко Г.А., Журба О.С., Шереверов В.Д. Послеспиртовая барда в качестве органического удобрения // *Ликероводочное производство и виноделие*. 2008. № 7. С. 12–15.

#### References

1. Tikhomirov V.K. Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya [Foams. Theory and practice of their receiving and destruction]. Moscow: Khimiya. 1983. 263 p.
2. Bekker Z.E. Fiziologiya i biokhimiya [Physiology and biochemistry]. Moscow: Publ. of Moscow state University M.V. Lomonosov. 1986. 227 p.
3. Buzulukov V.I., Cherkasov V.D., Emel'yanov A.I., Syrkinina N.P., Gartseva S.O. The proteinaceous converter for foam concretes. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2013. No 7, pp. 23–27. (In Russian).
4. Zalashko M.V. Biotekhnologiya pererabotki molochnoi syvorotki [Bio-technology of processing of whey]. Moscow: Agropromizdat. 1990. 192 p.
5. Yarovenko V.L. Tekhnologiya spirta [Technology of alcohol]. Moscow: Kolos. 2002. 465 p.
6. Patent RF 2141930. *Sposob prigotovleniya belkovogo penoobrazovatelya* [Way of preparation of proteinaceous frother]. Solomatov V.I., Cherkasov V.D., Buzulukov V.I. Declared 21.04.1998. Published 27.11.1999. Bulletin No. 21. (In Russian).
7. Patent RF 2162070. *Penoobrazovatel'* [Foamer] Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Kiselev E.V., Groshev V.M. Declared 18.08.1999. Published 20.01.2001. Bulletin No. 2. (In Russian).
8. Komarov V.I., Lebedev E.I., Manuilova T.A. Problem of use of secondary resources of branches of food and processing industry and their influence on environment. *Pishchevaya promyshlennost'*. 1998. No. 2, pp. 9–12. (In Russian).
9. Nenaidenko G.A., Zhurba O.S., Shereverov V.D. Distillery grains as organic fertilizer. *Likerovodchnoe proizvodstvo i vinodelie*. 2008. No. 7, pp. 12–15. (In Russian).

# СТРОИТЕЛЬСТВО

## 2016

Межрегиональная специализированная  
**ВЫСТАВКА-ПРАКТИКУМ**

B2G | B2B | B2C

**26-27 ОКТЯБРЯ**  
Воронеж

Место проведения:  
Воронежский государственный  
архитектурно-строительный  
университет




ВетА

ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР

(473) 2-512-012

www.veta.ru

Г.С. СЛАВЧЕВА, д-р техн. наук (gslavcheva@yandex.ru),  
Е.М. ЧЕРНЫШОВ, д-р техн. наук, академик РААСН (chem@vgasu.vrn.ru)

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

## Алгоритм конструирования структуры цементных пенобетонов по комплексу задаваемых свойств

Предложена процедура конструирования структуры пенобетонов, которая опирается на классическую методологию постановки и решения оптимизационных задач. Целью конструирования являлось формирование структуры пенобетона, обеспечивающей формирование заданного уровня конструкционных свойств в технологическом цикле и максимально эффективную их реализацию при эксплуатационных воздействиях. Представлены примеры разработанных алгоритмов решения задачи конструирования пенобетонов для конструкционного (1200–1600 кг/м<sup>3</sup>) и конструкционно-теплоизоляционного (800–1200 кг/м<sup>3</sup>) пенобетонов минимальной деформативности с нормируемыми характеристиками по плотности, прочности в сухом и влажном состоянии при задаваемых значениях характеристик исходных компонентов. Использование разработанных алгоритмов позволило обосновать решения по параметрам состава и структуры разновидностей пенобетонов на основе различных видов природных и техногенных сырьевых компонентов.

**Ключевые слова:** пенобетон, конструирование структуры, техногенное сырье, природное сырье.

G.S. SLAVCHEVA, Doctor of Sciences (Engineering) (gslavcheva@yandex.ru),  
E.M. CHERNYSHOV, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS (chem@vgasu.vrn.ru)  
Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering (84, 20-letiya Oktyabrya Street, 394006, Voronezh, Russian Federation)

### An Algorithm of Designing of Cement Foam Concretes Structure According to the Complex of Preset Properties

A procedure of designing of the structure of foam concretes which is based on the classical methodology of setting and solution of optimization problems is proposed. The purpose of the design is to form the foam concrete structure providing the formation of the set level of structural properties in the technological cycle and maximally efficient their realization under operational impacts. Examples of the algorithms developed for solving the task of foam concrete designing for structural (1200–1600 kg/m<sup>3</sup>) and structural heat-insulating (800–1200 kg/m<sup>3</sup>) foam concretes of minimal deformability with normalized characteristics of density, strength in the dry and wet states at preset values of characteristics of initial components are presented. The use of developed algorithms makes it possible to substantiate the decisions on parameters of the composition and structure of various foam concretes on the basis of natural and anthropogenic raw components.

**Keywords:** foam concrete, structure design, anthropogenic raw material, natural raw material.

Технико-экономическая эффективность применения пенобетонов в малоэтажном монолитном строительстве [1] обеспечивается возможностью возведения несущих и ограждающих конструкций здания из материала различной плотности, получаемого на одном и том же сырье и оборудовании. Для широкого внедрения этих, потенциально эффективных бетонов в строительную практику при разработке материаловедческих и технологических решений их производства требуется исходить из условий обеспечения строительно-технических свойств во всем жизненном цикле. Иными словами, задаваемый уровень свойств должен быть обеспечен не только на момент изготовления, но и на протяжении всего периода эксплуатации, когда реализация свойств определяется интенсивностью развития процессов износа в материале как следствие суммарного действия механических нагрузок и физико-климатических факторов.

Средством управления движущими силами (балансом сил) изменений в системе материал — эксплуатационная среда и соответственно проявлением свойств и интенсивностью износа являются характеристики строения материала. Исходя из этого целью конструирования материала следует считать формирование такой его структуры, которая обеспечивает формирование конструкционных свойств в технологическом цикле и максимально эффективную их реализацию при эксплуатации.

При этом концептуально требуется согласованное выполнение задач обеспечения набора свойств материала, соответствующего условиям его работы в конструкции, а также минимизации запаса избыточной энергии в структуре материала, определяющей меру изменения состояния и свойств в заданных условиях эксплуатации.

При выполнении этого концептуального требования следует исходить из того, что обеспечение задаваемого набора свойств пенобетонов приходится вести в ситуации, когда оптимумы параметров состава и структуры оказываются разными для свойств материала. С учетом этого при решении вопросов конструирования структуры требуется определить зону компромиссных решений, которая и может считаться рациональной для данного материала. Выполнение требования по минимизации запаса избыточной энергии структуры достигается через изменение величины активной площади поверхности, удельной поверхностной энергии и смачиваемости поверхности твердой фазы, размерно-геометрических характеристик и энергонасыщенности объема порового пространства.

Формирование необходимой для выполнения выдвинутых условий структуры материала реализуется через следующую систему управляющих факторов: соотношение компонентов матрицы и включений, их химический, минералогический, гранулометрический состав; параметры процессов структурообразования и твердения и др. В этом смысле к технологическим средствам регулирования следует отнести:

- расход, вид и состав вяжущего как основы матричного материала бетона;
- расход, вид и гранулометрию заполнителей и наполнителей как включений в структуре бетона;
- исходное содержание воды затворения в формовочной смеси;
- дозировку химических добавок ПАВ, обеспечивающих формирование макропористости.

При этом следует рассчитывать не на аддитивный, а скорее на синергетический эффект влияния управляю-

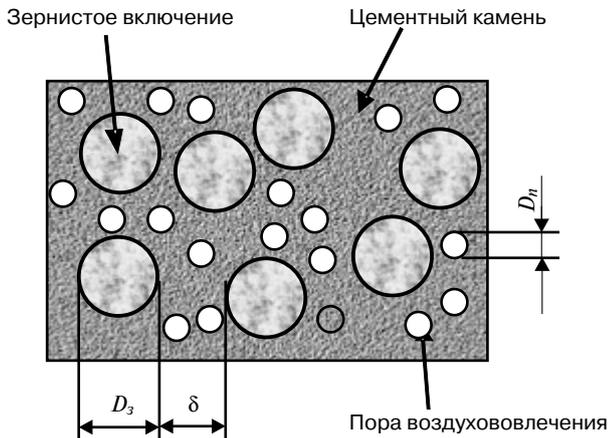
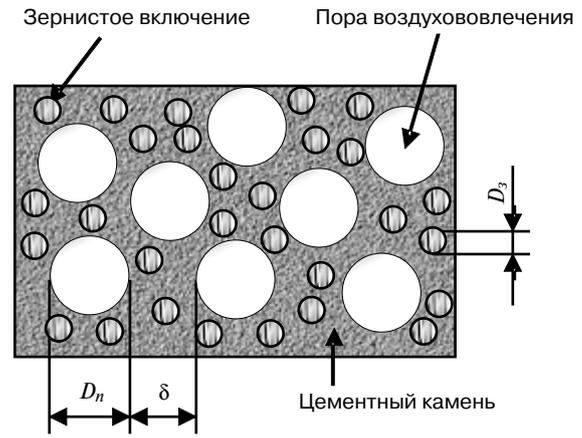
а Модель 1 ( $D_n < D_3$ )б Модель 2 ( $D_n > D_3$ )

Рис. 1. Модели структуры поризованного бетона: а – средней плотности 1200–1600 кг/м<sup>3</sup>; б – средней плотности 800–1000 кг/м<sup>3</sup>

ших рецептурно-технологических факторов на характеристики структуры твердой фазы и порового пространства и соответственно на формирование и проявление свойств.

Предлагаемые подходы к конструированию структуры опираются на классическую методологию постановки и решения оптимизационных задач, определяющую обоснование и выбор критериев оптимизации, ограничений, граничных условий [2–4]:

$$\left. \begin{aligned} F &= f_i(x_i) \rightarrow \max(\min) \Rightarrow \text{ЦФ} \\ g_i(x_j) &= 0 \Rightarrow \text{ОГР} \\ a_j &\leq x_j \leq b_j \Rightarrow \text{ГРУ} \\ i &= \overline{1, m}; \\ j &= \overline{1, n} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где:  $f_i(x_i)$  – целевая функция ЦФ (критерий оптимизации);  $g_i(x_j)$  – функциональные ограничения (ОГР);  $x_i$  – оптимизируемые параметры управления (в нашем случае параметры состава и структуры материала);  $a_j, b_j$  – значения параметров управления (рецептурно-технологические факторы), составляющие граничные условия задачи (ГРУ).

В связи с многокритериальностью задачи оптимизации, когда нужно достигнуть задаваемого уровня качества одновременно по ряду свойств, критерий оптимизации (целевая функция  $f_i(x_i)$ ) будет представлять собой тот из показателей качества конкретного вида бетона, который является критическим для его долговечности и надежности работы конструкции в соответствующих условиях эксплуатации. Требования к остальным свойствам, не отраженным в целевой функции, должны соответствовать нормируемым значениям свойств. Они учитываются в виде функциональных ограничений  $g_i(x_j)$  для их значений.

В данной работе в качестве целевой функции и функциональных ограничений используются феноменологические экспериментально-статистические количественные зависимости типа: рецептурно-технологические факторы – состав, структура, состояние материала – свойства материала, полученные в результате математической обработки накопленного авторами массива экспериментальных данных. Обозначенные подходы опираются на достижения компьютерного материаловедения [5–11] в решении прикладных задач материаловедения и технологии строительных композитов математическими методами, позволяющими объединить экспериментально-статистические зависимости с концептуальными моделями структуры материала как пространственно-геометрические системы.

При решении задачи конструирования использованные полученные экспериментально-статистических зависимостей соотносится с концептуальными модельными представлениями о структуре пенобетонов, которые позволяют определить предельно допустимые значения параметров факторного пространства управления  $x_i$  (параметров состава и структуры материала), т. е. обосновать граничные условия задачи. Полагается, что трансформация структуры пенобетона по мере изменения его средней плотности определяет возможность существования по крайней мере двух граничных типов (моделей) структуры (рис. 1):

- модель 1 – поры воздухововлечения относительно мелкие, их объем относительно невелик (до 0,4 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>). В этой ситуации более крупные, чем макропоры, включения зерен песка диаметром  $D_3$  образуют пространственный каркас, который омоноличивается цементным камнем, наполненным включениями воздухововлеченных пор диаметром  $D_n < D_3$ ;
- модель 2 – поры воздухововлечения относительно крупные, их объемное содержание повышенное (0,5–0,8 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>); диаметр зернистых включений меньше диаметра макропор. В этом случае макропоры окружены (омоноличены) материалом, состоящим из цементного камня, наполненного зернистыми включениями ( $D_n > D_3$ ).

В бетоне со структурой по модели 1 очевиден предел меры поризации, т. е. возможности размещения объема генерируемых макропор  $D_n$  в объеме, занимаемом межзерновыми прослойками толщиной  $\delta$ . Поэтому данная модель свойственна структуре конструкционного бетона с небольшой степенью поризации ( $r = 1200–1600$  кг/м<sup>3</sup>) и характеризуется наличием пространственного каркаса из зерен песка, омоноличиваемых цементной матрицей с относительно невысокой степенью поризации.

При увеличении содержания макропор структура бетона неизбежно приближается к модели 2, которая отвечает структуре конструкционно-теплоизоляционного бетона с большей степенью поризации ( $r = 800–1200$  кг/м<sup>3</sup>). Для данной модели принципиально важным становится требование конгруэнтности размера зерен включений  $D_3$  толщине межпоровой перегородки  $\delta$ , так как для эффективного использования потенциала прочности межпоровых перегородок в конструкции структуры пенобетона необходимо выполнение условия квазиоднородности структуры матричного материала, в соответствии с которым размер включения должен быть меньше величины  $\delta$  как минимум в 4–5 раз.

Таблица 1

Факторное пространство регулирования параметров структуры пенобетонов (граничные условия)

Наименование структурной характеристики	Диапазон значений параметров структуры	
	Конструкционный бетон (1200–1600 кг/м <sup>3</sup> )	Конструкционно-теплоизоляционный бетон (800–1200 кг/м <sup>3</sup> )
Объем макропор $V_{\text{ВП}}, \text{м}^3/\text{м}^3$	0,25–0,42	0,42–0,62
Объем микробетона (межпоровых перегородок) в пенобетоне $V_{\text{МБ}}, \text{м}^3/\text{м}^3$	0,58–0,75	0,38–0,58
Объем включений в единице объема микробетона $V_{\text{ВКЛ}}, \text{м}^3/\text{м}^3$	0,4–0,55	0,2–0,4
Объем микропор в единице объема микробетона $V_{\text{МП}}, \text{м}^3/\text{м}^3$	0,2–0,3	0,25–0,38
Диаметр зерен включений $d_{\text{ВКЛ}}, \text{мкм}$	150–370	30–170
Теплота смачивания поверхности включений $d_{\text{ВКЛ}}, \text{кДж/кг}$	0,7–1	0,8–3

Таблица 2

Экспериментально-статистические зависимости\* между свойствами конструкционного пенобетона (1200–1600 кг/м<sup>3</sup>) и структурными факторами их регулирования

Свойства	Экспериментально-статистические зависимости**	
	На уровне пенобетона (ПБ)	На уровне микробетона (МБ)
Средняя плотность	$\rho = 1912 - 1665 V_{\text{ВП}}$ (2)	
Прочность при сжатии	$R_{\text{ПБ}} = R_{\text{МБ}} \cdot e^{-4,6 V_{\text{ВП}}}$ (3)	$R_{\text{МБ}} = R_{\text{ИК}} \cdot e^{-2,1 V_{\text{ВКЛ}}}$ (5)
	$R_{\text{ПБ}}^W = -0,003 W^2 - 0,3 W + R_{\text{ПБ}}^{W=0}$ (4)	
Влажностная усадка	$\varepsilon_{\text{ПБ}} = \varepsilon_{\text{МБ}} \cdot e^{0,49 V_{\text{ВП}}}$ (6)	$\varepsilon_{\text{МБ}} = \varepsilon_{\text{ИК}} \cdot e^{-1,88 V_{\text{ВКЛ}}}$ (7)
Мера ползучести	$C = 4,6 e^{6,1 V_{\text{ВП}}} \cdot 10^5$ для $q_{\text{вкл}} = 0,7-1$ (8)	
	$C = 6,2 e^{5,4 V_{\text{ВП}}} \cdot 10^5$ для $q_{\text{вкл}} = 1-2$ (9)	
Влажность	$W_{\text{ПБ}} = W_{\text{МБ}} \cdot e^{0,58 V_{\text{ВП}}}$ (10)	$W_{\text{МБ}} = -2,89 q^2 + 13,79 q - 5,69$ (11)

**Примечания.**  
 \* Для диапазона значений диаметра зерен включений  $d_{\text{ВКЛ}} = 150-400 \text{ мкм}$ .  
 \*\* Обозначения соответствуют приведенным в табл. 1.

Проведенные аналитические расчеты структурных параметров пенобетонов позволили определить требования к диапазону значений основных структурных характеристик конструкционного и конструкционно-теплоизоляционного пенобетона для плотности 800–1600 кг/м<sup>3</sup> (табл. 1), ограничивающих факторное пространство управления при конструировании их структуры.

В цементных пенобетонах нормального твердения критическим свойством для долговечности конструкций выступает их трещиностойкость, определяемая эксплуатационной деформируемостью – усадкой и ползучестью. На основании этого в задаче конструирования бетона функцией цели при нахождении оптимальных параметров состава и структуры твердой фазы и порового пространства следует считать минимум деформативности.

Решение задачи конструирования при разработке алгоритмов ведется последовательно от макро- к микромасштабному уровню структуры бетона. Именно в соответствии с этим используются понятия бетон, микробетон, цементный камень. Конструирование осуществляется, во-первых, путем направленного формирования макроструктуры бетона на основе учета влияния пор воздухововлечения в матрице микробетона на задаваемые свойства. Во-вторых, путем нахождения рациональных характеристик строения самого матричного материала – микробетона. При этом учитываются те характеристики исходных компонентов бетона, которые имеют определяющее значение для энергетических характеристик твердой фазы и порового пространства и соответственно влияют на реализацию задаваемых свойств при эксплуатационных воздействиях.

На рис. 2, 3 представлены примеры разработанных алгоритмов решения задачи конструирования пенобетонов в следующей постановке:

- 1) для конструкционного пенобетона ставится цель обеспечить минимум деформаций ползучести с нормируемыми характеристиками по плотности, прочности в сухом и влажном состоянии (при задаваемых значениях характеристик исходных компонентов);
- 2) для конструкционно-теплоизоляционного пенобетона цель связывается с обеспечением минимума влажностной усадки с нормируемыми характеристиками по плотности, прочности (также при задаваемых значениях характеристик исходных компонентов).

Расчеты по предлагаемым алгоритмам базируются на совокупности экспериментально-статистических зависимостей (табл. 2, 3), которые были получены по результатам комплекса экспериментальных исследований для пенобетонов, изготовленных с использованием сырьевых компонентов, отличающихся по происхождению (природных и техногенных), химическо-минералогическому составу (силикатное, алюмосиликатное, карбонатсодержащее сырье, золы-уноса, хвосты обогащения и т. д.), по дисперсному составу.

Алгоритм расчетов при решении задачи 1 включает следующую систему шагов (рис. 2):

- 1) задаются характеристики, нормируемые по плотности, прочности и минимальные по ползучести; обозначаются начальные условия по характеристикам сырьевых компонентов;
- 2) исходя из зависимости (2) для заданной средней плотности пенобетона вычисляется объем пор воздухововлечения;
- 3) на основании зависимости (3) для заданной прочности пенобетона требуемой средней плотности рас-

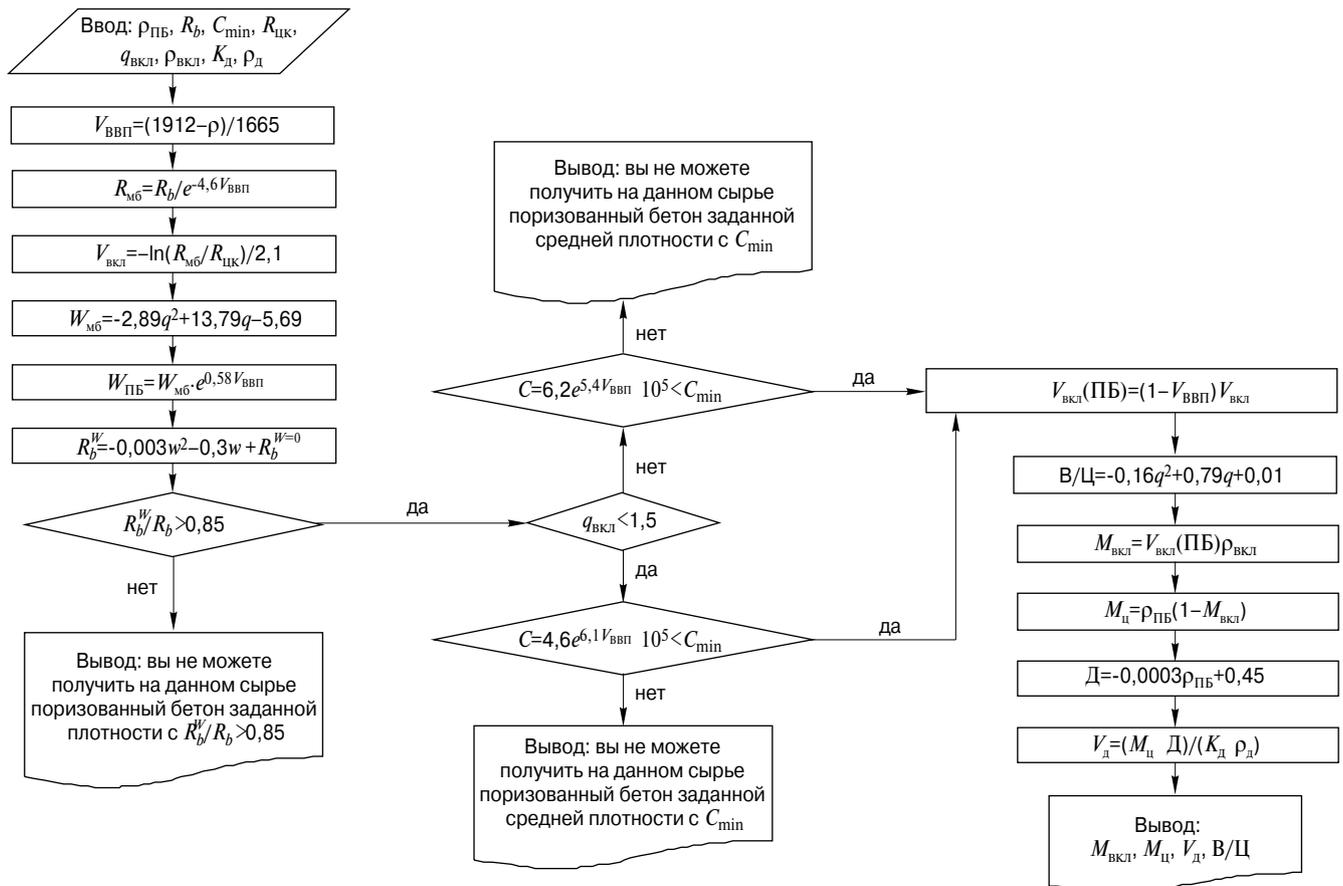


Рис. 2. Алгоритм конструирования конструкционного поризованного бетона по критерию минимальной ползучести

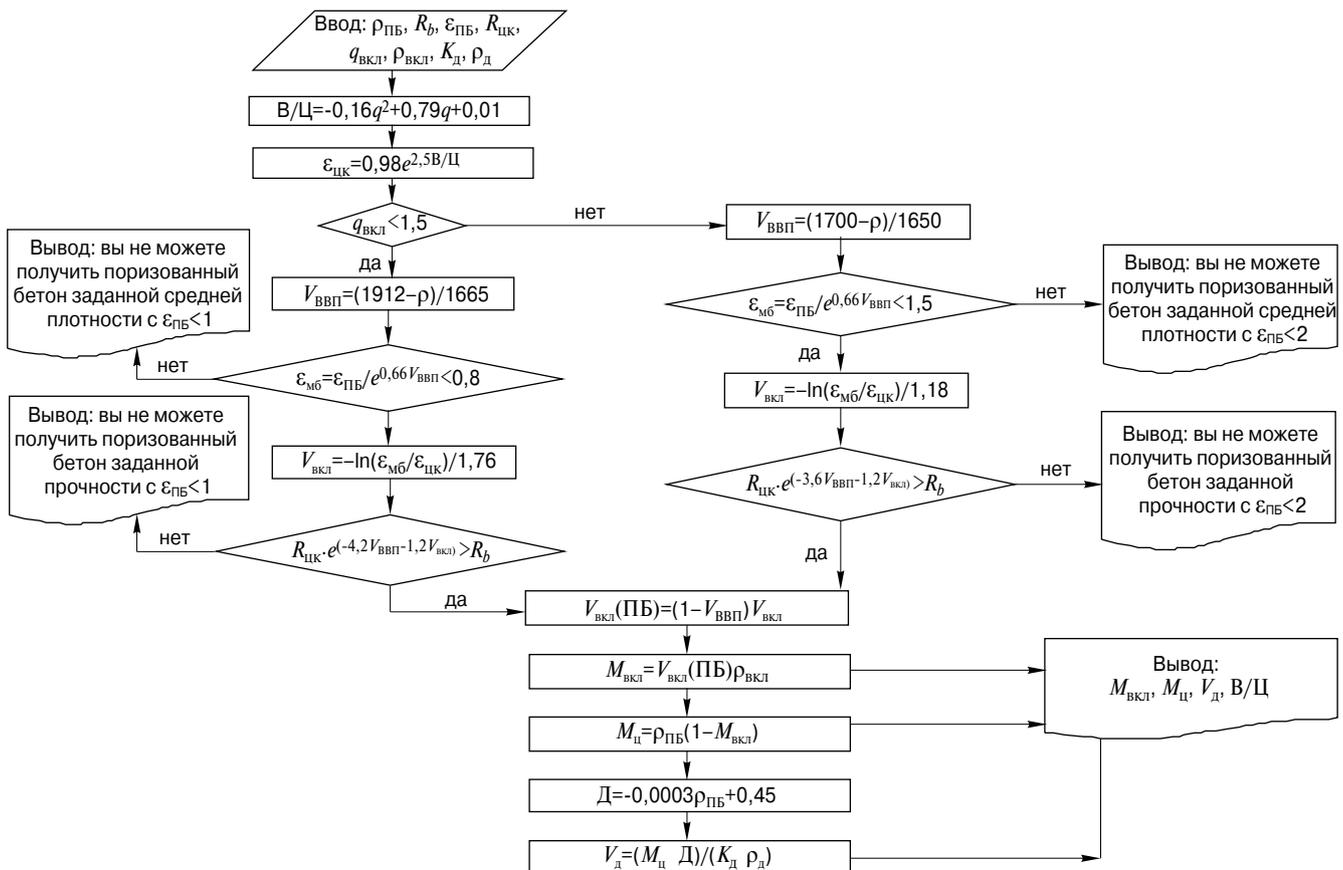


Рис. 3. Алгоритм конструирования конструкционно-теплоизоляционного поризованного бетона по критерию минимальной усадки

Таблица 3

Экспериментально-статистические зависимости\* между свойствами конструкционно-теплоизоляционного пенобетона (800–1200 кг/м³) и структурными факторами их регулирования\*\*

Свойства	Экспериментально-статистические зависимости**	
	На уровне пенобетона (ПБ)	На уровне микробетона (МБ)
Средняя плотность	$\rho = 1912 - 1665 V_{\text{ВВП}}$ для $q_{\text{вкл}} = 0,8-1,5$ (12)	-
	$\rho = 1700 - 1650 V_{\text{ВВП}}$ для $q_{\text{вкл}} = 1,5-3$ (13)	
Предел прочности при сжатии	$R_{\text{ПБ}} = R_{\text{МБ}} \cdot e^{-4,2 V_{\text{ВВП}}}$ для $q_{\text{вкл}} = 0,8-1,5$ (14)	$R_{\text{МБ}} = R_{\text{ЦК}} \cdot e^{-1,2 V_{\text{вкл}}}$ (16)
	$R_{\text{ПБ}} = R_{\text{МБ}} \cdot e^{-3,6 V_{\text{ВВП}}}$ для $q_{\text{вкл}} = 1,5-3$ (15)	
Влажностная усадка	$\varepsilon_{\text{ПБ}} = \varepsilon_{\text{МБ}} \cdot e^{0,66 V_{\text{ВВП}}}$ для $q_{\text{вкл}} = 0,8-1,5$ (17)	$\varepsilon_{\text{МБ}} = \varepsilon_{\text{ЦК}} \cdot e^{-1,76 V_{\text{вкл}}}$ для $q_{\text{вкл}} = 0,8-1,5$ (18)
	$\varepsilon_{\text{ПБ}} = \varepsilon_{\text{МБ}} \cdot e^{1,3 V_{\text{ВВП}}}$ для $q_{\text{вкл}} = 1,5-3$ (19)	$\varepsilon_{\text{МБ}} = \varepsilon_{\text{ЦК}} \cdot e^{-1,18 V_{\text{вкл}}}$ для $q_{\text{вкл}} = 1,5-3$ (20)
	-	$\varepsilon_{\text{ЦК}} = 0,98 \cdot e^{2,5 B/\text{Ц}}$ (21)

**Примечания.**  
 \* Для диапазона значений диаметра зерен включений  $d_{\text{вкл}} = 30-170$  мкм;  
 \*\* Обозначения соответствуют приведенным в табл. 1.

Таблица 4

Характеристики параметров структуры и состава пенобетонов на различных видах сырья

Характеристики		Вид бетона								
		Конструкционный бетон на кварцевом песке			Конструкционно-теплоизоляционный бетон					
		D1600	D1400	D1200	на молотом песке		на золе-уноса		на карбонатной пыли-уноса	
D1000	D800				D1000	D800	D1000	D800		
Свойства наполнителей	Дисперсность	$M_k = 1,2-1,6$			$S_{\text{уд}} = 150 \text{ м}^2/\text{кг}$		$S_{\text{уд}} = 350 \text{ м}^2/\text{кг}$		$S_{\text{уд}} = 120 \text{ м}^2/\text{кг}$	
	Эквивалентный диаметр зерен $d_{\text{вкл}}$ , мкм	250			40		25		65	
	Теплота смачивания поверхности включений $q_{\text{вкл}}$ , кДж/кг	0,71			0,97		1,65		2,77	
Параметры структуры бетона	Объем пор воздухововлечения $V_{\text{ВВП}}$ , м³/м³	0,24	0,32	0,42	0,48	0,58	0,44	0,54	0,38	0,45
	Объем микробетона (межпоровых перегородок) $V_{\text{МБ}}$ , м³/м³	0,76	0,68	0,58	0,57	0,46	0,57	0,46	0,57	0,46
	Средний эквивалентный диаметр пор воздухововлечения, мкм	120	250	360	430	520	300	410	510	640
	Толщина межпоровой перегородки, мкм	-			150-250		100-210		210-350	
	Объем включений $V_{\text{вкл}}$ , м³/м³	0,38	0,35	0,31	0,26	0,23	0,27	0,2	0,28	0,22
	Объем цементного камня как суммарный объем цементирующего вещества с присущими ему микропорами $V_{\text{ЦК}} = V_{\text{ЦВ}} + V_{\text{МП}}$ , м³/м³	0,38	0,33	0,27	0,31	0,26	0,3	0,26	0,29	0,24
Состав бетона	Расход цемента, кг/м³	550	475	380	315	280	300	275	285	240
	Расход наполнителя, кг/м³	1050	925	820	685	520	700	525	715	560
	В/Ц	0,43	0,43	0,45	0,8	0,7	1	0,9	1	0,8
	Расход добавки ПАВ, л/м³	2,8	3,3	3,8	4,8	5,6	4,5	5,5	4,3	4,8

считывается необходимая для ее обеспечения прочность микробетона  $R_{\text{МБ}}$ ;

4) исходя из соотношения (5) для найденного значения  $R_{\text{МБ}}$  и с учетом марки цемента рассчитывается допустимый для ее обеспечения объем включений;

5) для фактических значений теплоты смачивания водой наполнителя в соответствии с соотношением (11) рассчитывается влажность микробетона ( $W_{\text{МБ}}$ );

6) по соотношению (10) для найденных значений  $W_{\text{МБ}}$  и объема пор воздухововлечения ( $V_{\text{ВВП}}$ ) определяется минимально возможная для заданных характеристик сырья величина эксплуатационного влагосодержания пенобетона ( $W_{\text{ПБ}}$ );

7) с учетом полученного значения  $W_{\text{ПБ}}$  и в соответствии с нормируемой прочностью бетона по соотношению (4) рассчитывается его прочность во влажном состоянии;

8) соотношение прочности в сухом и влажном состоянии проверяется на соответствие заданной ее величине;

9) на основании зависимостей (8) или (9) и с учетом характеристик наполнителя для заданной средней плотности и соответствующего объема пор воздухововлечения определяется значение меры ползучести, которое проверяется на соответствие минимума ее величины;

10) для заданной средней плотности и соответствующего объема пор воздухововлечения определяется объем зернистых включений в 1 м³ пенобетона;

11) для фактических значений теплоты смачивания водой наполнителя рассчитывается В/Ц, обеспечивающее необходимую по условиям поризации консистенцию бетонной смеси в соответствии с соотношением  $V/\text{Ц} = -0,16q^2 + 0,79q + 0,01$ ;

12) с учетом характеристик сырья (плотности  $\rho_d$  и концентрации  $K_d$  добавки ПАВ, плотности зерен вклю-

чений  $\rho_{\text{вкл}}$ ) определяется состав пенобетона заданной средней плотности по расходу на  $1 \text{ м}^3$  цемента ( $M_{\text{ц}}$ ), наполнителя ( $M_{\text{вкл}}$ ), добавки ПАВ ( $V_{\text{д}}$ ), по В/Ц. Именно этот расчетный состав позволяет сформировать структуру материала, обеспечивающую получение минимума ползучести (целевой функции) пенобетона при эксплуатации.

Алгоритм расчетов при решении задачи 2 включает следующую свою систему шагов (рис. 3):

1) задаются нормируемые характеристики по плотности, прочности, допустимой величине влажностной усадки; обозначаются начальные условия по характеристикам сырьевых компонентов;

2) для фактических значений теплоты смачивания водой наполнителя рассчитывается В/Ц, обеспечивающее необходимую по условиям поризации консистенцию бетонной смеси в соответствии с соотношением  $V/Ц = -0,16q^2 + 0,79q + 0,01$ ;

3) по зависимости (21) вычисляется соответствующая найденному значению В/Ц величина усадки цементного камня  $\epsilon_{\text{цк}}$ ;

4) с учетом характеристик наполнителя для заданной средней плотности пенобетона вычисляется объем пор воздухововлечения исходя из зависимостей (12) или (13);

5) на основании зависимостей (17) или (19) и с учетом характеристик наполнителя для допустимой по условиям задачи величины усадки пенобетона заданной средней плотности рассчитывается необходимая для ее обеспечения усадка микробетона  $\epsilon_{\text{мб}}$ ;

6) для найденного значения  $\epsilon_{\text{мб}}$  рассчитывается необходимый для ее обеспечения объем включений исходя из соотношений (18) или (20);

7) с использованием формул (14–16) и с учетом марки цемента определяется обеспечиваемое для найден-

ных параметров структуры ( $V_{\text{ВВП}}$  и  $V_{\text{ВКЛ}}$ ) значение прочности пенобетона, которое проверяется на соответствие заданной величине;

8) для заданной средней плотности и соответствующего объема пор воздухововлечения определяется объем зернистых включений в  $1 \text{ м}^3$  пенобетона;

9) с учетом характеристик сырья (плотности  $\rho_{\text{д}}$  и концентрации  $K_{\text{д}}$  добавки ПАВ, плотности зерен включений  $\rho_{\text{вкл}}$ ) определяется состав пенобетона заданной средней плотности по расходу на  $1 \text{ м}^3$  цемента ( $M_{\text{ц}}$ ), наполнителя ( $M_{\text{вкл}}$ ), добавки ПАВ ( $V_{\text{д}}$ ), по В/Ц. Именно этот состав позволяет сформировать структуру материала, обеспечивающую получение минимума усадки (целевой функции).

Использование рассмотренных и подобных алгоритмов, разработанных авторами для других условий задач конструирования, позволили обосновывать решения по оптимизации параметров состава и структуры, технологии получения разновидностей как конструкционных ( $1200\text{--}1600 \text{ кг/м}^3$ ), так и конструкционно-теплоизоляционных ( $800\text{--}1200 \text{ кг/м}^3$ ) пенобетонов (табл. 4). Для полученных разновидностей пенобетонов произведена комплексная оценка основных конструкционных характеристик: прочности, вязкости разрушения, влажностной усадки, морозостойкости, теплопроводности. По ее результатам установлено, что уровень качества полученных бетонов не только полностью удовлетворяет нормативным требованиям, но и по ряду показателей лучше нормируемых значений [12–15]. Особенно важно, что показатели влажностной усадки полученных конструкционных бетонов не превышают  $0,8 \text{ мм/м}$ , конструкционно-теплоизоляционных бетонов —  $1,5 \text{ мм/м}$  при нормируемой ее величине  $\leq 3 \text{ мм/м}$  для ячеистых бетонов неавтоклавного твердения.

#### Список литературы

1. Славчева Г.С., Котова К.С. Вопросы повышения эффективности применения неавтоклавных ячеистых бетонов (пенобетонов) в строительстве // *Жилищное строительство*. 2015. № 8. С. 44–47.
2. Петухов О.А., Морозов А.В., Петухова Е.О. Моделирование: системное, имитационное, аналитическое. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. 288 с.
3. Ногин В.Д., Протодеяконов И.О., Евлампиев И.И. Основы теории оптимизации. М.: Высшая школа, 1986. 384 с.
4. Трусов П.В. Введение в математическое моделирование. М.: Логос, 2005. 440 с.
5. Баженов Ю.М., Воробьев В.А., Илюхин А.В., Киврин В.К., Попов В.П. Компьютерное материаловедение строительных композитных материалов. М.: Изд-во Российской инженерной академии, 2006. 256 с.
6. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. Рецептурно-технологические поля свойств материала в компьютерном строительном материаловедении // *Строительные материалы*. № 7. 2006. С. 8–11.
7. Данилов А.М., Гарькина И.А. Теория систем: математические методы строительного материаловедения. Пенза: ПГУАС, 2008. 239 с.
8. Воробьев В.А., Васильев Ю.Э., Марсов В.И., Бокарев Е.И. Возможности и перспективы компьютерного моделирования строительных композитных материалов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 3. С. 62–63.
9. Шинкевич Е.С., Чернышов Е.М., Луцкий Е.С., Тымняк А.Б. Многокритериальная оптимизация состава и свойств активированных известково-кремнеземистых композитов // *Сухие строительные смеси*. 2013. № 2. С. 33–37.

#### References

1. Slavcheva G.S., Kotova K.S. Questions of increase of efficiency application foam concrete in the building. *Zhilyshchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2015. No. 8, pp. 44–47. (In Russian).
2. Petukhov O.A., Morozov A.V., Petukhova E.O. Modelirovanie: sistemnoe, imitatsionnoe, analiticheskoe [Modeling: system, imitating, analytical]. Saint-Petersburg: SZTU. 2008. 288 p.
3. Nogin V.D., Protod'yakonov I.O., Evlampiev I.I. Osnovy teorii optimizatsii [Fundamentals of optimization theory] Moscow: Vysshaya shkola. 1986. 384 p.
4. Trusov P.V. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie [Introduction to mathematical modeling]. Moscow: Logos. 2005. 440 p.
5. Bazhenov Yu.M., Vorob'ev V.A., Ilyukhin A.V., Kivrin V.K., Popov V.P. Komp'yuternoe materialovedenie stroitel'nykh kompozitnykh materialov [Computer building materials composite materials]. M.: Izd-vo Rossiiskoi inzhenernoi akademii. 2006. 256 p.
6. Voznesenskiy V.A., Lyashenko T.V. Prescription and technological fields in the material properties of building materials science computer *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 7, pp. 8–11. (In Russian).
7. Danilov A.M., Gar'kina I.A. Teoriya sistem: matematicheskie metody stroitel'nogo materialovedeniya [Systems theory: mathematical methods of building materials]. Penza: PGUAS. 2008. 239 p.
8. Vorob'ev V.A., Vasil'ev Yu.E., Marsov V.I., Bokarev E.I. Opportunities and prospects of computer modeling of building composite materials. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2012. No. 3, pp. 62–63. (In Russian).
9. Shinkevich E.S., Chernyshov E.M., Lutskin E.S., Tymnyak A.B. Multi-criteria optimization of the compo-

10. Белов В.В., Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Образцов И.В., Бобрышев А.А. Компьютерное моделирование и оптимизирование составов композиционных строительных материалов. М.: Издательство АСВ, 2015. 263 с.
11. Волченко Е.Ю. Использование математических методов и компьютерных моделей для оптимизации составов композиционных материалов // *Вестник Волжского института экономики, педагогики и права*. 2015. № 1. С. 11–16.
12. Славчева Г.С., Новиков М.В., Чернышов Е.М. Изменение механических свойств поризованного бетона во времени // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2008. № 10. С. 224–230.
13. Славчева Г.С. Эксплуатационная деформируемость и гигрометрические характеристики цементных поризованных бетонов как функция их структуры // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура*. 2008. № 1. С. 81–87.
14. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Управление эксплуатационной деформируемостью и трещиностойкостью макропористых (ячеистых) бетонов. Часть 1. Контекст проблемы и вопросы теории // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 105–112.
15. Славчева Г.С. Структурные факторы обеспечения морозостойкости цементных пенобетонов // *Строительные материалы*. 2015. № 9. С. 52–56.
- sition and properties of activated lime-siliceous composites. *Sukhie stroitel'nye smesi*. 2013. No. 2, pp. 33–37. (In Russian).
10. Belov V.V., Bobryshev A.N., Erofeev V.T., Obratsov I.V., Bobryshev A.A. Komp'yuternoe modelirovanie i optimizirovanie sostavov kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov [Computer modeling and optimization of formulations of composite building materials] Moscow: ACB. 2015. 263 p.
11. Volchenko E.Yu. Using mathematical methods and computer models for optimize the formulation of composite materials. *Vestnik Volzhskogo instituta ekonomiki, pedagogiki i prava*. 2015. No. 1, pp. 11–16. (In Russian).
12. Slavcheva G.S., Novikov M.V., Chernyshov E.M. Changing the mechanical properties of porous concrete in time. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2008. No. 10, pp. 224–230. (In Russian).
13. Slavcheva G.S. Operating deformability and radiometric characteristics of porous cement concrete as a function of their structure. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2008. No. 1, pp. 81–87. (In Russian).
14. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. Control over operational deformability and crack resistance of macro-porous (cellular) concretes: context of problem and issues of theory. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 1–2, pp. 105–112. (In Russian).
15. Slavcheva G.S. Structural factors provide frost cement foam concretes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 9, pp. 52–56. (In Russian).

**СТРОЙ ЭКСПО КРЫМ** | **VI СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ СТРОИТЕЛЬНАЯ ВЫСТАВКА В КРЫМУ** | **21–23 ОКТЯБРЯ**

Место проведения: **ГК «ЯЛТА-ИНТУРИСТ»** 

**ЭКСПОКРЫМ** группа компаний

# ЭКСПОКРЫМ  +7 (978) 900 90 90 [www.expocrimea.com](http://www.expocrimea.com)

УДК 666.972.16

Ю.Р. КРИВОБОРОДОВ, д-р техн. наук,  
А.А. ЕЛЕНОВА, специалист (aurika-zolotko@mail.ru)

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева (125480, Москва, ул. Героев-Панфиловцев, 20)

## Применение микродисперсных добавок для ускорения твердения цемента

В статье приведены результаты влияния искусственно синтезированных микродисперсных добавок кристаллогидратов на основе сульфоалюминатов кальция на свойства цементного камня. Выявлена эффективность использования роторно-пульсационного аппарата (РПА) в качестве активатора-гомогенизатора для получения микродисперсных добавок. Показана возможность ускорения твердения цементного камня введением в его состав микродисперсных добавок. Установлено, что в присутствии микродисперсных добавок кристаллогидратов в цементном камне изменяется фазовый состав гидратных новообразований в сторону увеличения количества гидросиликатов кальция. Данное положение подтверждается увеличением степени гидратации цемента, количества связанной воды во все сроки твердения камня. Предложено использовать микродисперсные добавки, играющие роль затравок для кристаллизации этtringита и гидросиликатов кальция, для повышения прочности цементного камня в ранние сроки твердения.

**Ключевые слова:** цемент, гидратация, твердение, добавки, прочность.

Yu.R. KRIVOBORODOV, Doctor of Sciences (Engineering),

A.A. ELENOVA, Specialist (aurika-zolotko@mail.ru)

Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (20, Geroev Panfilovtsev Street, 125480 Moscow, Russian Federation)

### The Use of Micro-Disperse Additives for Accelerating Cement Hardening

Results of the influence of artificially synthesized micro-disperse additives of crystalline hydrates on the basis of calcium sulfoaluminates on the properties of cement stone are presented. The efficiency of using the rotary-pulsation apparatus (RPA) as an activator-homogenizer for obtaining micro-disperse additives is revealed. The possibility of accelerating the hardening of cement stone by means of introducing micro-disperse additives in its composition is shown. It is established that in the presence of micro-disperse additives of crystalline hydrates in cement stone, the phase composition of hydrate new formations changes in the direction of increasing the amount of calcium hydro-silicates. This fact is confirmed by increasing the degree of cement hydration, the amount of bound water in all periods of stone hardening. It is proposed to use micro-disperse additives, which play the role of seeds for crystallization of ettringite and calcium hydro-silicates, for increasing the strength of cement stone at early stages of hardening.

**Keywords:** cement, hydration, hardening, additives, strength.

Проблема управления твердением цемента является актуальной. От успехов ее решения зависят экономия цемента, темпы упрочнения и снижение энергозатрат при производстве бетонных и железобетонных изделий. Известны работы [1–5], направленные на повышение эффективности твердения цементного камня. До сих пор эти вопросы обсуждаются на многочисленных международных и национальных совещаниях, конференциях, конгрессах [6, 7].

Обзор упомянутых работ показывает, что активация твердения цементного камня достигается использованием быстротвердеющих и высокопрочных цементов. Однако это связано с большими энергозатратами. К тому же ожидаемый эффект активации достигается не всегда. Особенно это касается раннего периода гидратации и твердения, продолжительность которого исчисляется от 1–3 ч до 1–3 сут. Процесс гидратации цемента в этот период особенно чувствителен к условиям твердения цементного камня, поэтому многими исследователями предложены различные добавки для обеспечения быстрого образования первичных гидратных фаз, от состава которых зависят последующие физико-механические свойства цементного камня и бетона. Для ускорения твердения были предложены кренты (кристаллизационные компоненты) [8], алюминатные компоненты [9, 10], цеолиты [11] и др. Однако в силу некоторых обстоятельств в настоящее время они не используются.

Целью работы авторов являлась разработка состава и способа введения комплексной добавки в состав твердеющего цемента, обеспечивающей ускорение твердения цементного камня.

**Исходные материалы и методы исследования.** В работе использовали портландцемент ПЦ 500-Д0,

ЦЕМ II/A-Ш 32,5 ОАО «Подольск-Цемент»; микродисперсные добавки, синтезированные из химически чистых реагентов: 1)  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ; 2)  $\text{CaO} + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Соотношение реагентов в добавках 1 и 2 брали из расчета получения этtringита. Добавки вводили в состав цемента в виде водных суспензий после их обработки в роторно-пульсационном аппарате (РПА).

Определение физико-механических свойств цемента производили стандартными методами, а также на малых образцах-балочках размером  $1 \times 1 \times 3$  см. Для установления состава продуктов гидратации применяли рентгенофазовый и дифференциально-термический анализы и методы оптической и электронной микроскопии.

**Результаты исследования.** Смеси 1 и 2, обработанные в РПА в течение 5 мин., добавляли в количестве 1–5 мас.% к портландцементу ПЦ Д0. Результаты представлены на рис. 1.

Предел прочности при сжатии образцов из цемента с микродисперсной добавкой, состоящей из  $\text{CaO} + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , в количестве 1; 3; 5 % через 1 и 3 сут твердения на 30–60% выше предела прочности при сжатии образцов без добавок. К 28 сут образцы с добавками также имели на 20% большую прочность, чем прочность образцов бездобавочного цемента.

Предел прочности при сжатии образцов из цемента с активированной микродисперсной добавкой 2 (смесь  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) в количестве 1; 3; 5 % через 1 и 3 сут твердения на 20–50% выше предела прочности при сжатии образцов без добавок. Так же к 28 сут образцы с добавками имели прочность, большую на 15%, прочности бездобавочных образцов.

Оптимальной концентрацией активированной кристаллогидратной добавки, приводящей к макси-

Таблица 1

Время твердения, сут	Степень гидратации, %							
	ПЦ	ПЦ с добавкой CaO + Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>			ПЦ с добавкой Ca(OH) <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>			
		1%	3%	5%	1%	3%	5%	10%
3 сут	62	65,4	68,2	70,5	63,6	67,4	70	70
28 сут	68,7	71,1	73,5	81,4	71,4	72,4	77	84,3

Таблица 2

Время твердения, сут	Количество связанной воды, %		
	ПЦ	Дозировка CaO + Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> - 3%	Дозировка Ca(OH) <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> - 3%
3 сут	17	19,4	19
28 сут	19	20,8	20

мальному повышению прочности цементного камня, является величина 3% от массы цемента, дальнейшая дозировка приводит к снижению прочности, вызванной расширением цементного камня. Использование активации добавки в РПА благоприятно влияет на прочностные характеристики и увеличивает их в 2 раза по сравнению с получением добавки в магнитной мешалке. Самые высокие результаты были получены при работе с добавкой CaO + Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> активированной в РПА

Через 3 и 28 суток гидратации эти образцы показали значительное отличие от образцов без добавок. На рентгенограммах образцов трех суточного твердения присутствовали дифракционные максимумы с  $d = 9,71; 5,6; 3,89; 2,43 \text{ \AA}$  и др., указывающие на присутствие этtringита; гидросиликата кальция C-S-H (II) с  $d = 9,8; 3,08; 2,85; 2,40; 1,83; 1,56 \text{ \AA}$ ; портландита Ca(OH)<sub>2</sub> с  $d = 4,93; 3,11; 2,63; 1,92; 1,79; 1,49 \text{ \AA}$  и непрореагировавшего алита C<sub>3</sub>S с  $d = 3,03; 2,77; 2,6 \text{ \AA}$ . На рентгенограммах цементного камня с микродисперсной добавкой также отмечено наличие C-S-H (II), Ca(OH)<sub>2</sub> и алита. С течением времени и увеличением количества добавок интенсивность дифракционных максимумов этtringита увеличивалась, а интенсивность дифракционных максимумов Ca(OH)<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O и алита уменьшалась. Интенсивность пиков гидратных соединений и новообразований в образцах с различными добавками, твердеющих одинаковое время увеличивалось.

Уменьшение Ca(OH)<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O связано с ростом кристаллов гидросульфоалюмината кальция, который также способствовал более интенсивной гидратации минералов исходного цемента (табл.1).

К 28 суткам твердения наблюдается снижение интенсивности пика алита и повышение степени гидратации до 80% при введении добавки до 5%. Это подтверждает, что присутствие этtringита ускоряет процесс гидратации и структурообразование цементного камня.

На кривых ДТА образцов с добавками и образцов без добавок во все сроки гидратации присутствовал эндотермический эффект, соответствующий сумме двух эффектов, — процесс дегидратации гидросиликатов и этtringита.

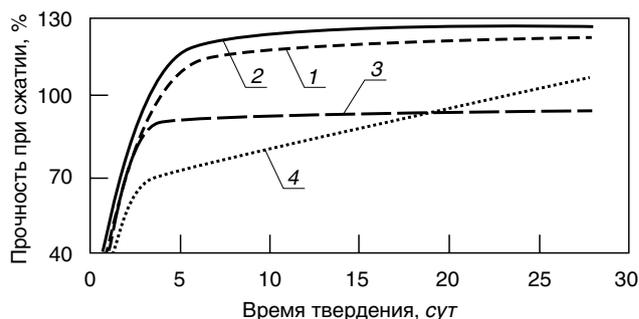


Рис. 1. Прочность образцов с добавкой смеси (CaO + Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>), активированной в РПА: 1 – 1%; 2 – 3%; 3 – 5%; 4 – контрольный

Первый, довольно большой эндотермический эффект, составляющий сумму двух эндотермических эффектов процесса дегидратации гидросиликатов и этtringита наблюдали при 140–150°C; относительно небольшой эндоэффект при 510°C соответствовал дегидратации портландита. Кроме того, отмечено наличие небольшого эффекта в области 800–820°C принадлежащего переходу гидросиликатов кальция в волластонит. У образцов с микродисперсными добавками кристаллогидратов несколько уменьшилась площадь эффекта, характеризующего дегидратацию гидроксида кальция. Количество связанной воды в образцах без добавок через 3 сут было меньше на 14% по сравнению с образцами с добавкой CaO+Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> дозировкой 3% и на 11% по сравнению с образцами с добавкой Ca(OH)<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> дозировкой 3%. К 28 сут количество связанной воды еще увеличилось (табл. 2).

Количество гидроксида кальция уменьшилось, что вызвано связыванием его при росте кристаллов этtringита.

Таким образом, на основании данных рентгенофазового анализа можно сделать выводы, что присутствие микродисперсных добавок кристаллогидратов в цементном камне изменяет фазовый состав гидратных новообразований в сторону увеличения количества гидросиликатов кальция; данный факт подтверждается увеличением степени гидратации цемента и интенсивности пиков гидросиликатов во все сроки твердения цементного камня.

Результаты ДТА свидетельствуют об увеличении степени гидратации цемента в присутствии добавки кристаллогидрата, на что указывает возрастание количества воды при нагреве цементов до 1000°C. На дериватограмме наблюдается несколько эндотермических эффектов при 150; 510; 800°C, которые определяют дегидратацию соответствующих гидратных соединений.

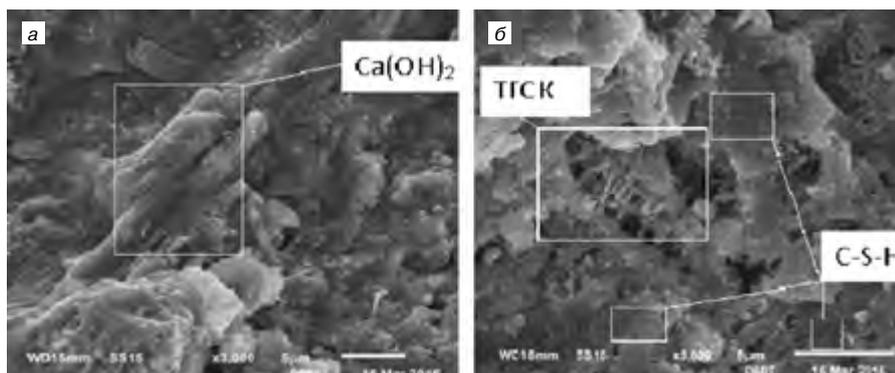


Рис. 2. Микроструктура цементного камня: а – без добавок; б – с микродисперсной добавкой

Повышение скорости гидратации обусловлено уменьшением экранирующего действия гидратных оболочек на зернах цемента за счет роста кристаллов новообразований на подложках кристаллизации в пространстве между частицами, а также быстрым выведением продуктов гидратации из сферы реакции.

При введении добавок кристаллогидратов значительно увеличивается как скорость зародышеобразования, так и скорость роста кристаллов этtringита. Большую скорость роста кристаллов этtringита можно объяснить высоким отношением у них величин длины к диаметру. Равномерное распределение снижает общую пористость цементного камня с 25 до 13–14%. Это, в свою очередь, отражается на микроструктуре затвердевшего цемента с микродисперсны-

ми добавками, а именно кристаллы этtringита равномерно распределяются по структуре образца (рис. 2).

#### Выводы.

Микродисперсные добавки повышают прочность вяжущего не только в результате увеличения степени гидратации при кристаллизации новообразований на поверхности зерен цемента, но также за счет уплотнения структуры, которое происходит при кристаллизации новообразований, внесенных извне и располагающихся в порах цементного камня. В результате этого увеличивается плотность и число контактов между отдельными гидратами, а следовательно, повышается как ранняя, так и марочная прочность.

#### Список литературы

1. Патент РФ 2332388. Высокопрочный бетон / Сватовская Л.Б., Соловьева В.А., Степанова И.В., Сычева А.Н., Коробов Н.В., Старчуков Д.С. Заявл. 11.12.2006. Опубл. 27.08.08. Бюл. № 24.
2. Ушеров-Маршак А.В. Оценка эффективности влияния химических и минеральных добавок на ранние стадии гидратации цементов // *Неорганические материалы*. 2004. Т. 40. № 8. С. 1014–1019.
3. Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Гамалии Е.А., Черных Т.Н., Зимич В.В. Модификаторы цементных бетонов и растворов. Технические характеристики и механизм действия. Челябинск: ООО «Искра Профи», 2012. 202 с.
4. Курдовский В.С. Химия цемента и бетона. Краков: Ассоциация Производителей Цемента, 2010. 728 с.
5. Людвиг Х.-М., Дрессель Д. Синтетические гидраты силиката кальция в сборных железобетонных конструкциях // *Международное бетонное производство*. 2011. № 5. С. 42–46.
6. Talero R., Rahhal V. Influence of «aluminic» pozzolans, quartz and gypsum additives on Portland cement hydration. Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal. 2007, pp. 22–35.
7. Scrivener K.L., Nonat A. Hydration of cementitious materials – present and future // *Cement and Concrete Research*. 2011. v. 41. № 7, pp. 641–650.
8. Дмитриев А.М., Кузнецова Т.В., Юдович Б.Э., Запольский А.К. Гидратационное легирование цементов // *Цемент*. 1983. № 11. С.4–6.
9. Kouznetsova T.V., Krivoborodov Y.R., Samchenko S.V., Burlov I.Y. Special cements on base sulphoaluminate clinker. 13th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). Madrid. Spain. 2011. p. 198.1–198.6
10. Самченко С.В., Зорин Д.А., Борисенкова И.В. Влияние дисперсности глиноземистого шлака и сульфоалюминатного клинкера на формирование структуры цементного камня // *Техника и технология силикатов*. 2011. Т. 18. № 2. С. 12–14.
11. Гувалов А.А., Аббасова С.И., Кузнецова Т.В. Улучшение структуры высокопрочного бетона с применением модификаторов // *Строительные материалы*. 2015. № 12. С. 78–81.

#### References

1. Patent RF 2332388. Vysokoprochnyi beton [High-strength concrete]. Svatovskaya L.B., Solov'eva V.A., Stepanova I.V., Sycheva A.N., Korobov N.V., Starchukov D.S.; Declared 11.12.2006. Published 27.08.08. Bulletin No. 24. (In Russian).
2. Ushero-Marshak A.V. Evaluation of the effect of chemical and mineral admixtures on the early stages of cement hydration. *Neorganicheskie materialy*. 2004. No. 8 (40), pp. 1014–1019. (In Russian).
3. Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Gamalii E.A., Chernykh T.N., Zimich V.V. Modifikatory tsementnykh betonov i rastvorov (tekhnicheskie kharakteristiki i mekhanizm deistviya) [Modifiers cement concrete and grout (technical characteristics and mechanism of action)] Chelyabinsk: Iskra Profi, 2012. 202 p.
4. Kurdovskii V.S. Khimiya cementa i betona [Cement and concrete chemistry] Krakov: Assotsiatsiya Proizvoditelei Tsementa. 2010. 728 p. (In Russian).
5. Lyudvig Kh.-M., Dressel' D. Synthetic calcium hydrosilicates in precast concrete structures. *Mezhdunarodnoe betonnoe proizvodstvo*. 2011. No. 5, pp. 42–46. (In Russian).
6. Talero R., Rahhal V. Influence of «aluminic» pozzolans, quartz and gypsum additives on Portland cement hydration. Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal. 2007, pp. 22–35.
7. Scrivener K.L., Nonat A. Hydration of cementitious materials – present and future. *Cement and Concrete Research*. 2011. V.41. No. 7, pp. 641–650.
8. Dmitriev A.M., Kuznetsova T.V., Yudovich B.E., Zapolskii A.K. Alloying hydration of cement. *Cement*. 1983. No. 11, pp. 4–6. (In Russian).
9. Kouznetsova T.V., Krivoborodov Y.R., Samchenko S.V., Burlov I.Y. Special cements on base sulphoaluminate clinker. 13th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). Madrid, Spain, 2011, pp. 198.1–198.6
10. Samchenko S.V., Zorin D.A., Borisenkova I.V. Influence of dispersion aluminous slag and sulfoaluminate clinker the formation of structure cement stone. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2011. No. 2 (8), pp. 12–14. (In Russian).
11. Guvalov A.A., Abbasova S.I., Kuznetsova T.V. Improved high-strength concrete structure using modifiers. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 12, pp. 78–81. (In Russian).

ПОДПИСКА НА ЭЛЕКТРОННУЮ ВЕРСИЮ ЖУРНАЛА

<http://http://rifsm.ru/page/5/>

Т.А. НИЗИНА<sup>1</sup>, д-р техн. наук (nizinata@yandex.ru);  
А.Н. ПОНОМАРЕВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук (9293522@gmail.com); А.С. БАЛЫКОВ<sup>1</sup>, инженер

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, 68)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

## Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок

Приведены результаты исследования физико-механических характеристик дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов с полифункциональными модифицирующими добавками. Предложены приемы комплексного дисперсного армирования мелкозернистых бетонов неметаллической фиброй различного вида, что позволяет направленно формировать структуру таких композитов на различных масштабных уровнях. Изучено влияние фибры трех видов: полипропиленовое мультифиламентное и полиакрилонитрильное синтетическое волокно специальной обработки с длиной резки 12 мм, а также модифицированная астраленами базальтовая микрофибра длиной 100–500 мкм. В качестве модифицирующих добавок использовались: микрокремнезем конденсированный уплотненный; высокоактивный метакаолин и гидроизолирующая добавка в бетонную смесь. Анализ результатов исследования насыщенного D-оптимального плана осуществлялся по треугольным диаграммам Гиббса–Розебома, построенным по полиномиальным моделям типа «смесь I, смесь II, технология – свойства», позволяющим проследить влияние 6 варьируемых факторов в двухмерном пространстве. Подтверждена целесообразность комплексного применения модифицирующих добавок и дисперсных волокон, в том числе наномодифицированных, для улучшения свойств мелкозернистых бетонов. Выявлены составы с комплексом наилучших упругопрочностных характеристик.

**Ключевые слова:** дисперсно-армированный мелкозернистый бетон, полифункциональная добавка, дисперсное волокно, синтетические волокна.

T.A. NIZINA<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (nizinata@yandex.ru),

A.N. PONOMAREV<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (9293522@gmail.com), A.S. BALYKOV<sup>1</sup>, Engineer

<sup>1</sup> National Research Mordovia State University (68, Bolshevistskaya Street, Saransk, 430005, Republic of Mordovia, Russian Federation)

<sup>2</sup> National Research Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University (29, Polytechnicheskaya Street, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation)

### Fine Disperse-Reinforced Concretes on the Basis of Complex Modifying Additives

Results of the study of physical-mechanical characteristics of disperse-reinforced fine concretes with poly-functional modifying additives are presented. Methods for complex disperse reinforcement of fine concretes with non-metallic fiber of different types are proposed; they make it possible to directionally form the structure of such composites at various scale levels. The influence of fibers of three types has been studied. They are polypropylene multifilament and polyacrylonitrile synthetic specially processed fibers with the cutting length of 12 mm, as well as basalt microfiber modified with astralenes with the length of 100–500 microns. As modifying additives, micro-silica condensed and compacted, high active metakaolin, and a hydro-isolating additive in the concrete mix are used. An analysis of the study of the saturated D-optimal plan is made with the help of three-angle diagrams of Gibbs-Rosebom built according to polynomial models of “mix I, mix II, technology-properties” types which make it possible to trace the influence of 6 variable factors in the two-dimensional space. The feasibility of the complex use of modifying additives and disperse fibers, including nano-modified, for improving the properties of fine concretes is substantiated. Compositions with the best complex of elastic-strength characteristics are identified.

**Keywords:** disperse-reinforced fine concrete, polyfunctional additive, disperse fiber, synthetic fibers.

Эволюционное развитие понимания структуры как определяющего фактора в создании высокоэффективных строительных композитов происходит в направлении от макро- через мезо- к микроструктуре и с неизбежностью подходит к пониманию важности структур наноразмерного уровня [1]. В последнее десятилетие резко возрос интерес к исследованиям в области нанотехнологии строительных материалов, поскольку результаты таких исследований становятся основой внедрения в практику новых материалов, обладающих уникальными физико-механическими и физико-химическими характеристиками [2, 3].

В индивидуальном виде углеродные наночастицы, например фуллерены и нанотрубки, очень дорогие и трудномасштабируемые при производстве вещества, поэтому массовое применение их в строительстве затруднено. Однако благодаря усилиям российских ученых удалось синтезировать так называемые фуллероиды – наночастицы значительно более дешевые и эффективные в строительных композитах, чем фуллерены и нанотрубки. Их использование позволяет получать цементные изделия с лучшими показателями при меньшей стоимости [3].

Фуллереноподобные материалы (фуллероиды), так же как и фуллерены, представляют собой гигантские каркасные однослойные либо многослойные кластеры, составленные из сочетания углеродных гексагонов и пентагонов. При этом размеры фуллероидов позволяют отнести их к ряду классических наноматериалов (диаметр фуллерена C<sub>60</sub> – 0,67 нм; характерные диаметры нанотрубок – 1–3 нм для однослойных и 10–40 нм для многослойных, средний размер астраленов – 45 нм), от применения которых в ближайшем будущем столь многое ожидается [4].

Анизотропия и высокая термодинамическая устойчивость формы большинства фуллероидов определяют одноосную либо двuosную анизотропию свойств, в том числе их способность во внешних полях превращаться в аномально большие диполи, способные на мощное дисперсионное взаимодействие [5]. В работах [6, 7] было показано, что только одного специфического (фуллероидного) электронного строения для этой цели недостаточно, необходимы также определенные топологические особенности наночастиц. Так, например, наночастицы тороидальной формы (в отличие от других типов топологии) обладают способностью резонансно (в ты-

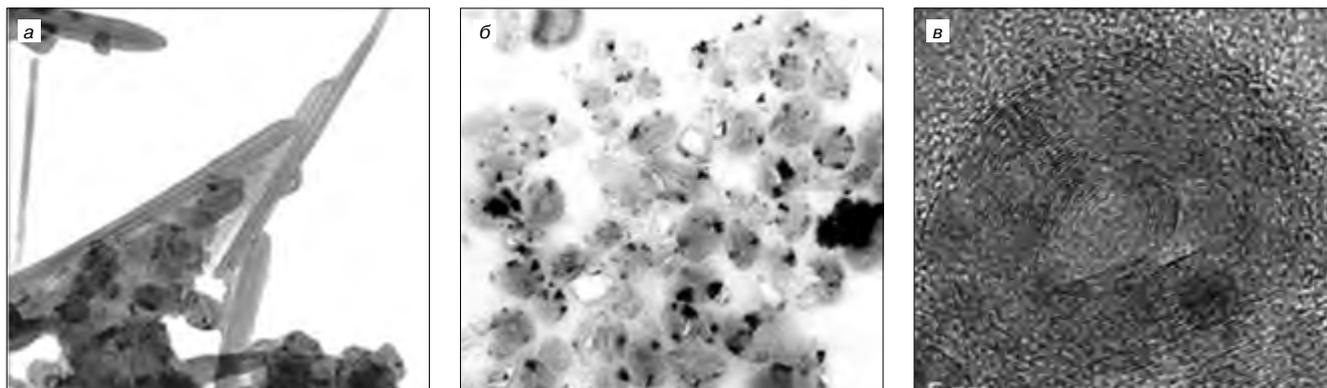


Рис. 1. Астралены: а – микрофотография явления агломерации астраленов на углеродных нанотрубках; б – структура астраленов; в – типичное изображение частицы астралена, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМВР) [3]

сачи раз) усиливать межмолекулярные взаимодействия, в том числе и на границах раздела фаз. Подобного типа углеродные наночастицы (астралены) были впервые в мире открыты и запатентованы [8] в ЗАО «НТЦ Прикладных нанотехнологий». Астралены (рис. 1) – многослойные тороподобные углеродные наноструктуры фуллероидного типа, создаваемые переработкой прекурсоров, образующихся при распылении масштабируемых графитовых анодов в плазме дугового разряда постоянного тока в атмосфере инертного газа [8, 9].

Известно, что бетон является гетерогенным материалом, имеет низкое отношение прочности при растяжении к прочности при сжатии, а также склонен к образованию микротрещин в процессе усадки при твердении. Перечисленные недостатки предопределили необходимость решения специальных задач по выявлению оптимальных условий совмещения бетонной матрицы с различными видами армирующих волокон, технические характеристики которых изменяются в широком диапазоне [10–12]. Применяя для армирования волокна разного вида или используя приемы комплексного дисперсного армирования фиброй различного вида, можно направленно регулировать характеристики бетона, обеспечивая тем самым требуемые эксплуатационные свойства и долговечность [13].

Практическим технологическим направлением использования структурирующих наноинициаторов в бетонных смесях является их предварительное нанесение на твердые носители; при этом параллельно решается задача «последовательного разбавления», необходимого для равномерного распределения каталитического количества необходимых наноинициаторов по объему бетонной смеси. При совместном применении различных

волокон и наноинициаторов каждое отдельное волокно в процессе созревания бетона «разрастается» в преимущественном направлении его расположения, тем самым усиливая эффект дисперсного армирования [2, 14]. Одним из перспективных носителей являются высоко-модульные микроволокна, среди которых все больший интерес представляет применение продуктов переработки промышленных отходов базальтовой фибры, производимой из расплава базальтовых пород, измельченных на специальных молотковых мельницах с классификаторами [14].

В данной работе была проведена оценка эффективности применения в составах модифицированных мелкозернистых бетонов фибры трех видов: полипропиленовое мультифиламентное волокно с длиной резки 12 мм, диаметром 25–35 мкм, плотностью 0,91 г/см<sup>3</sup> (ППН); полиакрилонитрильное синтетическое волокно специальной обработки FibARM Fiber WB с длиной резки 12 мм, диаметром 14–31 мкм, плотностью 1,17±0,03 г/см<sup>3</sup> (ПАН); модифицированная астраленами базальтовая микрофибра «Астрофлекс-МБМ» длиной 100–500 мкм, средним диаметром 8–10 мкм, насыпной плотностью 800 кг/м<sup>3</sup>, с содержанием астраленов 0,0001–0,01% от массы фибры (МБМ).

Факторы		Уровни варьирования				
		0	0,333	0,5	1	
Вид добавки	$v_1$	МКУ, % от массы цемента	0	6,667	10	20
	$v_2$	ВМК, % от массы цемента	0	2	3	6
	$v_3$	Адмикс, % от массы цемента	0	0,5	0,75	1,5
Вид фибры	$w_1$	ППН, % от массы цемента	0	0,333	0,5	1
	$w_2$	ПАН, % от массы цемента	0	0,5	0,75	1,5
	$w_3$	МБМ, % от массы цемента	0	1,667	2,5	5

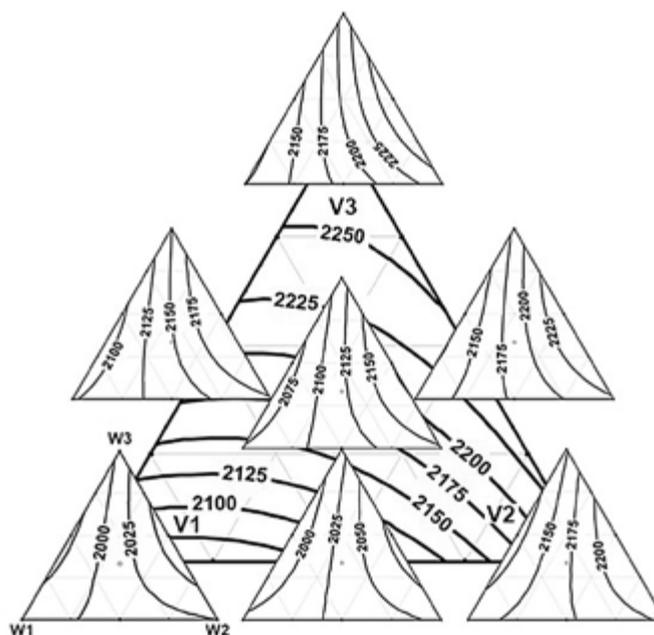


Рис. 2. Диаграммы «дисперсные волокна – свойство» и изолинии максимальных значений плотности цементных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов на треугольнике «модифицирующие добавки – свойство»

В качестве модифицирующих добавок использовался: микрокремнезем конденсированный уплотненный производства ОАО «Кузнецкие ферросплавы» (МКУ); высокоактивный метакаолин белый производства ООО «Мета-Д» (ВМК); гидроизоляционная добавка в бетонную смесь «Пенетрон Адмикс» (Адмикс). Выбор данных добавок обусловлен положительными результатами исследований [15–17], подтвердившими целесообразность применения тонкодисперсных минеральных порошков для модификации составов цементных композитов.

При проведении исследований был использован насыщенный D-оптимальный план, содержащий 15 опытных точек [18]. Уровни варьирования исследуемых факторов в кодированных величинах и их численные значения приведены в табл. 1. Неизменными составляющими фибробетонной смеси оставались: доля мелкозернистого заполнителя – 65% от массы твердой фазы и содержание суперпластификатора Melflux 1641 F – 0,5% от массы вяжущего.

В ходе проведения эксперимента исследовались характеристики мелкозернистых фибробетонов: плотность в нормальных влажностных условиях (ГОСТ 12730.1–78), прочность при сжатии (ГОСТ 310.4) и на растяжение при изгибе (ГОСТ 310.4) в возрасте 28 сут.

Экспериментально-статистические модели зависимости исследуемых физико-механических показателей качества мелкозернистых фибробетонов от его наполнителей в виде модифицирующих добавок (смесь I) и дисперсных волокон (смесь II) задавались в виде приведенного полинома MIMIQ «смесь I, смесь II – свойство» вида [13, 18]:

$$\hat{y} = b_{12} \cdot v_1 \cdot v_2 + b_{13} \cdot v_1 \cdot v_3 + b_{23} \cdot v_2 \cdot v_3 + d_{12} \cdot w_1 \cdot w_2 + d_{13} \cdot w_1 \cdot w_3 + d_{23} \cdot w_2 \cdot w_3 + k_{11} \cdot v_1 \cdot w_1 + k_{21} \cdot v_2 \cdot w_1 + k_{31} \cdot v_3 \cdot w_1 + k_{12} \cdot v_1 \cdot w_2 + k_{22} \cdot v_2 \cdot w_2 + k_{32} \cdot v_3 \cdot w_2 + k_{13} \cdot v_1 \cdot w_3 + k_{23} \cdot v_2 \cdot w_3 + k_{33} \cdot v_3 \cdot w_3. \quad (1)$$

Из модели  $M_1M_{II}Q$  было выделено два вида моделей «смесь I (модифицирующие добавки) – свойство» ( $\hat{y}(v_1, v_2, v_3)$ ;  $M_1Q$ ) и «смесь II (дисперсные волокна) – свойство» ( $\hat{y}(w_1, w_2, w_3)$ ;  $M_{II}Q$ ) при фиксировании соот-

ветствующей группы рецептурных факторов. При этом для каждого типа моделей и каждой исследуемой физико-механической характеристики построено по семь треугольных диаграмм Гиббса–Розебома в виде двумерных карт линий уровня (рис. 2–4) с использованием программы Statistica 10.0.1011.

Для дальнейшего анализа влияния наполнителей на свойства цементных композитов вводился обобщающий показатель – числовая характеристика поля свойства в виде абсолютного значения исследуемого показателя, соответствующего ее максимуму  $\hat{y}_{max}$ . ЭС-модели вида «смесь I – максимум свойства» ( $\hat{y}_{max}(v_1, v_2, v_3)$ ;  $M_1Q_{max}$ ) и «смесь II – максимум свойства» ( $\hat{y}_{max}(w_1, w_2, w_3)$ ;  $M_{II}Q_{max}$ ), отражающие связь между варьируемыми факторами и максимумами исследуемых свойств, представляют собой полиномиальные уравнения вида:

$$\hat{y}_{max} = b_1 \cdot v_1 + b_2 \cdot v_2 + b_3 \cdot v_3 + d_{12} \cdot v_1 \cdot v_2 + d_{13} \cdot v_1 \cdot v_3 + d_{23} \cdot v_2 \cdot v_3 + k_{123} \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot v_3; \quad (2)$$

$$\hat{y}_{max} = b_1 \cdot w_1 + b_2 \cdot w_2 + b_3 \cdot w_3 + d_{12} \cdot w_1 \cdot w_2 + d_{13} \cdot w_1 \cdot w_3 + d_{23} \cdot w_2 \cdot w_3 + k_{123} \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot w_3. \quad (3)$$

Используя полученные данные, были построены по две треугольные диаграммы Гиббса–Розебома для каждой исследуемой характеристики, отображающие соответствующие системы  $\hat{y}_{max}(v_1, v_2, v_3)$  и  $\hat{y}_{max}(w_1, w_2, w_3)$ . В качестве основных информационных элементов для анализа исследуемых свойств были приняты вторичные модели  $\hat{y}_{max(v)}(w)$ , представленные на рис. 2–4.

Проведенный анализ ЭС-моделей «модифицирующие добавки, дисперсные волокна – плотность» показал, что увеличение содержания ВМК, а в еще большей степени добавки Адмикс в общей массе применяемых модификаторов позволило получить цементные композиты с наибольшей плотностью (рис. 2), причем максимальные результаты были достигнуты при равном соотношении ПАН-фибры и МБМ (по 50%). Напротив, повышение доли микрокремнезема и полипропиленовой

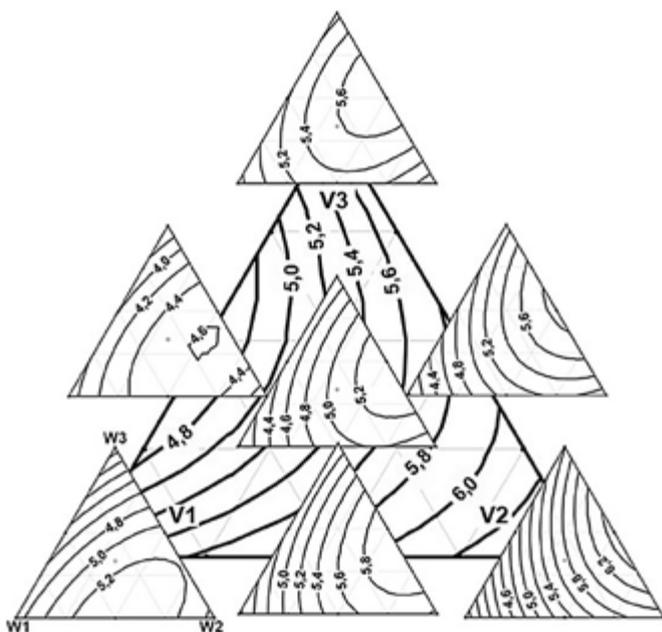


Рис. 3. Диаграммы «дисперсные волокна – свойство» и изолинии максимальных значений предела прочности на растяжение при изгибе цементных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов на треугольнике «модифицирующие добавки – свойство»

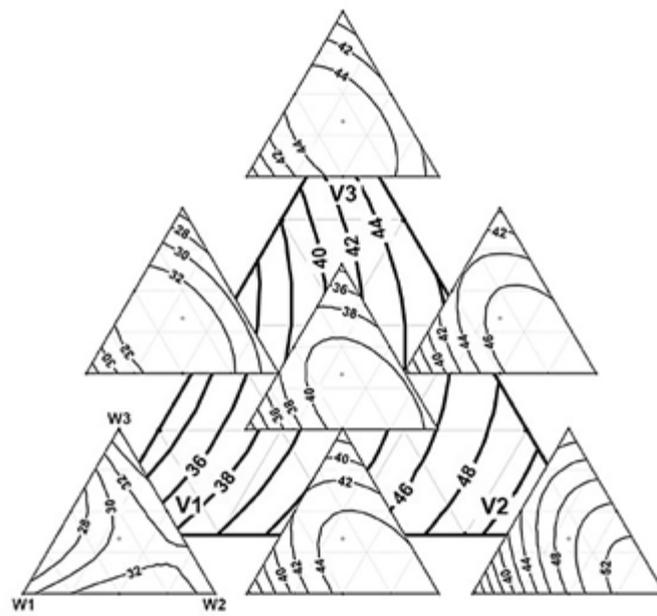


Рис. 4. Диаграммы «дисперсные волокна – свойство» и изолинии максимальных значений предела прочности при сжатии цементных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов на треугольнике «модифицирующие добавки – свойство»

фибры приводит к снижению плотности фибробетонов. Наиболее низкая плотность зафиксирована у цементных композитов, модифицированных добавкой микрокремнезема ( $v_1=1$ ) и дисперсно-армированных комплексом волокон «ППН+МБМ» при долях фибр, близких к  $w_1=w_3=0,5$ .

Более высокие значения плотности мелкозернистого бетона, модифицированного гидроизоляционной добавкой «Пенетрон Адмикс» (состоящей в основном из монокальциевого алюмината  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , диалюмината кальция  $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ , полугидрата гипса  $\text{CaSO}_4\cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ , клинкерных минералов  $\text{C}_3\text{S}$  и  $\text{C}_2\text{A}$ , а также  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), с точки зрения авторов, можно объяснить тем, что при гидратации цемента, а также в результате реакций между компонентами данной добавки и ионными комплексами кальция и алюминия, оксидами и солями металлов, содержащимися в цементном камне, появляются новообразования в виде гидросиликатов кальция тоберморитоподобной структуры, а также гидросульфалюминатов кальция состава  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$  или  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$  и гидрокарбоалюминатов кальция состава  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$  в незначительных количествах. Такие нерастворимые кристаллические новообразования, располагаясь в порах и дефектах цементного камня, уплотняют его структуру.

Установлено, что среди вводимых в состав бетонов активных минеральных добавок высокоактивный метаколин оказал наилучшее влияние на исследуемые

прочностные характеристики мелкозернистых дисперсно-армированных бетонов. При применении ПАН-волокна и МБМ повышение содержания ВМК привело к значительному росту предела прочности при сжатии и на растяжение при изгибе. Среди других используемых модификаторов для повышения предела прочности на растяжение при изгибе более предпочтительным является совместное использование добавки Адмикс с ПАН-фиброй и МБМ, а МКУ – с ППН и ПАН-волокном, особенно при их равных долях в паре вводимых фибр (рис. 3). Для приведенных выше модификаторов (Адмикс, МКУ) зона максимальных значений предела прочности при сжатии зафиксирована при практически равном соотношении трех видов фибр, т. е. при  $w_1\approx w_2\approx w_3$  (рис. 4).

#### Выводы.

По результатам анализа ЭС-моделей «модифицирующие добавки, дисперсные волокна – свойство» (рис. 2–4) можно сделать вывод о зависимости физико-механических характеристик дисперсно-армированных бетонов от оптимальности комбинаций полифункциональных модифицирующих добавок. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности комплексного применения модифицирующих и дисперсно-армирующих добавок различных размерных уровней в цементных композициях для повышения их эксплуатационных характеристик.

#### Список литературы

1. Артамонова О.В., Сергуткина О.Р. Строительные наноматериалы: тенденции развития и перспективы // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения*. 2013. Вып. 6. С. 13–23.
2. Фиговский О.Л., Бейлин Д.А., Пономарев А.Н. Успехи применения нанотехнологий в строительных материалах // *Нанотехнологии в строительстве*. 2012. № 3. С. 6–21.
3. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Никитин В.А., Староверов В.Д. Структура и свойства наномодифицированных цементных систем. *Международный конгресс «Наука и инновации в строительстве «SIB-2008». Современные проблемы строительного материаловедения и технологии*. Воронеж. 2008. Т. 1. Кн. 2. С. 424–429.
4. Shames A.I., Katz E.A., Panich A.M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J., Belousov V.P., Belousova I.M., Ponomarev A.N. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles // *Diamond & Related Materials*. 2008. Vol. 18. Iss. 2-3, pp. 505–510.
5. Пономарев А.Н. Нанобетон – концепция и проблемы. Синергизм наноструктурирования цементных вяжущих и армирующей фибры // *Строительные материалы*. 2007. № 6. С. 69–71.
6. Пономарев А.Н., Юдович М.Е., Груздев М.В., Юдович В.М. Неметаллическая наночастица во внешнем электромагнитном поле. Топологические факторы взаимодействия мезоструктур // *Вопросы материаловедения*. 2009. № 4 (60). С. 59–64.
7. Пономарев А.Н., Юдович М.Е., Юдович В.М. Возможности нанотехнологий в современном мире // *Нанотехнологии. Экология. Производство*. 2010. № 5. С. 112–113.
8. Патент РФ 2196731. *Полиэдральные многослойные углеродные наноструктуры фуллероидного типа* / Пономарев А.Н., Никитин В.А. Заявл. 21.09.2000. Опубл. 20.01.2003. Бюл. № 2.
9. Патент РФ 2397950. *Многослойные углеродные наночастицы фуллероидного типа тороидальной фор-*

#### References

1. Artamonova O.V. Building nanomaterials: trends and prospects. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-khimicheskie problemy i vysokie tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya*. 2013. Vol. 6, pp. 13–23. (In Russian).
2. Figovsky O.L., Beilin D.A., Ponomarev A.N. Successful implementation of nanotechnologies in building materials. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2012. No. 3, pp. 6–21. (In Russian).
3. Pukhareno Yu.V., Aubakirova I.U., Nikitin V.A., Staroverov V.D. Structure and properties of nano-modified cement systems. *International Con-gress «Science and Innovation in Construction «SIB-2008». Modern problems of building materials and technologies*. Voronezh. 2008. Vol. 1. Book. 2, pp. 424–429. (In Russian).
4. Shames A.I., Katz E.A., Panich A.M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J., Belousov V.P., Belousova I.M., Ponomarev A.N. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles. *Diamond & Related Materials*. 2008. Vol. 18. Iss. 2-3, pp. 505–510.
5. Ponomarev A.N. Nanoconcrete: Conception and problems. Synergism of nanostructuring cement binders and reinforcing fibers. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 6, pp. 69–71. (In Russian).
6. Ponomarev A.N., Yudovich M.E., Gruzdev M.V., Yudovich V.M. Non-metal nanoparticle in the outer electromagnetic field. Topological factors of mesostructures interaction. *Voprosy materialovedeniya*. 2009. No. 4 (60), pp. 59–64. (In Russian).
7. Ponomarev A.N., Yudovich M.E., Yudovich V.M. Possibilities of nano-technology in the modern world. *Nanotekhnologii. Ekologiya. Proizvodstvo*. 2010. No. 5, pp. 112–113. (In Russian).
8. Patent RF 2196731. *Poliedral'nye mnogoslouinye uglerodnye nanos-truktury fulleroidnogo tipa* [Polyhedral multilayer carbon nanostructures of fulleroid type]. Ponomarev A.N., Nikitin V.A. Declared 21.09.2000. Published 20.01.2003. Bulletin No. 2. (In Russian).
9. Patent RF 2397950. *Mnogoslouinye uglerodnye nanochastitsy ful-leroidnogo tipa toroidal'noi formy* [Multilayered

- мы / Пономарев А.Н., Юдович М.Е. Заявл. 23.04.2008. Оubl. 27.08.2010. Бюлл. № 24.
10. Рабинович Ф.Н. Дисперсно-армированные бетоны. М.: Стройиздат. 1989. 176 с.
  11. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография. М.: Издательство АСВ, 2004. 560 с.
  12. Загороднюк Л.Х., Шакарна М., Шекина А.Ю. Классификация добавок для армирования мелкодисперсных композитов // GISAP (*Global International Scientific Analytical Project*). Режим доступа: <http://gisap.eu/ru/node/23874>.
  13. Низина Т.А., Бальков А.С. Анализ комплексного влияния модифицирующих добавок и дисперсного армирования на физико-механические характеристики мелкозернистых бетонов // *Региональная архитектура и строительство*. 2015. № 4. С. 25–32.
  14. Патрикеев Л.Н. Нанобетоны // *Наноиндустрия*. 2008. № 2. С. 14–15.
  15. Низина Т.А., Балбалин А.В. Влияние минеральных добавок на реологические и прочностные характеристики цементных композитов // *Вестник ТГАСУ*. 2012. № 2. С. 148–153.
  16. Низина Т.А., Балбалин А.В. Механическая активация цементных смесей с полифункциональными добавками // *Региональная архитектура и строительство*. 2013. № 2. С. 36–42.
  17. Селяев В.П., Низина Т.А., Балбалин А.В. Многофункциональные модификаторы цементных композитов на основе минеральных добавок и поликарбоксилатных пластификаторов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. С. 156–163.
  18. Низина Т.А., Бальков А.С., Сарайкин А.С. Экспериментальные исследования дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов с полифункциональными модификаторами // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2015. № 4. С. 91–96.
- carbon nanoparticles of fulleroid type of toroidal shape]. Ponomarev A.N., Yudovich M.E. Declared 23.04.2008. Published 27.08.2010. Bulletin No. 24. (In Russian).
10. Rabinovich F.N. Dispersno armirovannyye betony [Disperse reinforced concretes]. Moscow: Stroyizdat. 1989. 176 p.
  11. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruksii: Monografiya [Composites based on disperse reinforced concretes. Questions of theory and design, technology, constructions: Monograph]. Moscow: ASV. 2004. 560 p.
  12. Zagorodnyuk L.Kh., Shakarna M., Shchekina A.Yu. Classification of additives for the reinforcement of particulate composites. GISAP (*Global International Scientific Analytical Project*). Access mode: <http://gisap.eu/ru/node/23874> (In Russian).
  13. Nizina T.A., Balykov A.S. Analysis of the combined effect of the modifier additives and particulate reinforcement on the physico-mechanical characteristics of fine-grained concretes. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2015. No. 4, pp. 25–33. (In Russian).
  14. Patrikeyev L.N. Nanobetonu. Nanoindustriya. 2008. No. 2, pp. 14–15. (In Russian).
  15. Nizina T.A., Balbalin A.V. Influence of mineral additives on the rheological and strength characteristics of cement composites. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2012. No. 2, pp. 148–153. (In Russian).
  16. Nizina T.A., Balbalin A.V. Mechanical activation of cement mixtures with polyfunctional additives. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2013. No. 2, pp. 36–42. (In Russian).
  17. Selyaev V.P., Nizina T.A., Balbalin A.V. Multifunctional modifiers of cement composites based on mineral admixtures and polycarboxylate plasticizers. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo univer-siteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013. Vol. 2. No. 31 (50), pp. 156–163. (In Russian).
  18. Nizina T.A., Balykov A.S., Saraikin A.S. Experimental studies disperse-reinforced fine-grained concretes with the polyfunctional modifiers. *UralNIIProekt RAASN*. 2015. No. 4, pp. 91–96. (In Russian).

# Крым Стройиндустрия Энергосбережение

МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

- Современные строительные материалы и технологии.
- Краски, лаки.
- Строительные машины и механизмы.
- Окна, двери. ● Сантехника.
- Экология. Системы очистки воды.
- Системы отопления, вентиляции и кондиционирования.
- Электротехническое и осветительное оборудование.
- Энергосбережение и использование нетрадиционных экологически чистых источников энергии.
- Системы автоматизации. Программное обеспечение предприятий строительной, энергетической, электротехнической отраслей промышленности.

## 2016

### Осень

27-29 октября  
г. Симферополь,  
ул. Киевская, 115,  
ДКП

Оргкомитет:  
Республика Крым,  
г. Симферополь,  
ул. Горького, 8, оф. 27,  
моб.: +7 978 78 178 83,  
тел./факс: +7(3652) 54-60-66,  
+7(3652) 54-67-46,  
E-mail:  
[marketing@expoforum.biz](mailto:marketing@expoforum.biz),  
<http://expoforum.biz/>



УДК 624:539.2

В.А. ВОЙТОВИЧ, канд. техн. наук, И.Н. ХРЯПЧЕНКОВА, канд. техн. наук

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65)

## Нанобетон в строительстве

Представлен обзор способов получения нанобетонов в современной строительной индустрии. Первый способ заключается в домолле традиционных портландцементов до наноразмерных величин и получении наноцементов. Технология изготовления такого наноцемента основана на совмещении механохимической активации зерен портландцемента в присутствии модификаторов с измельчением материалов до наноразмерного состояния. Второй способ заключается во введении в портландцемент наночастиц. Микрокремнезем образуется как побочный продукт при получении элементного кремния и кремнийсодержащих сплавов и обеспечивает создание сверхпрочных и долговечных бетонов. Введение в бетонную смесь дисперсии углеродных нанотрубок способствует ускорению процессов гидратации, упорядочивает поровую структуру нанобетона. Присутствие наночастиц, пригодных для модификации бетонов, обнаружено в некоторых природных минералах, в ряде промышленных отходов. Третий способ – синтез наночастиц непосредственно в бетонных смесях с применением исходных веществ – прекурсоров. Полученные способом так называемой золь-гель-технологии наночастицы диоксида кремния обнаруживают высокую эффективность.

**Ключевые слова:** нанобетон, наноцемент, наночастицы, прекурсоры, золь-гель-технология.

V.A. VOYTOVICH, Candidate of Sciences (Engineering), I.N. KHRYAPCHENKOVA, Candidate of Sciences (Engineering)  
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (65 Ilyinskaya Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation)

### Nano-Concrete in Construction

The review of methods for manufacturing nano-concretes in the nowadays building industry is presented. The first method is a finish grinding of traditional Portland cements until nano-size values and producing nano-cements. The technology of producing this nano-cement is based on the combination of mechanical-chemical activation of Portland cement grains in the presence of modifiers with the grinding of materials until the nano-size state. The second method is introducing nano-particles in Portland cement. Micro-silica is produced as a by-product in the course of producing the elemental silicon and silicon-containing alloys and provides the creation of super-strong and durable concretes. Introduction of the carbon nanotube dispersion accelerates the hydration process, regulates the porous structure of nano-concrete. The presence of nano-particles suitable for modification of concretes is detected in some natural minerals and industrial waste. The third method is the synthesis of nano-particles directly in concrete mixes with the use of initial substances – precursors. Nano-particles of the silicon dioxide obtained by the so-called sol-gel technology show high efficiency.

**Keywords:** nano-concrete, nano-cement, nano-particles, precursor, sol-gel technology.

Термин «нанобетон» (НБ) в публикациях по строительному материаловедению приобретает все более широкое хождение. Тем не менее пока не сложилось устойчивого определения этого понятия. Авторы предлагают называть нанобетоном строительный материал, который содержит в своем составе наносuspension, т. е. взвеси твердых наночастиц (наноразмерных хотя бы в одном направлении) в жидкостях.

НБ в настоящее время получают одним из трех принципиально различных способов. Первый заключается в домолле далеко не наноразмерных частиц традиционного портландцемента (ПЦ) до наноразмерных величин. Такой домол в обычных шаровых мельницах нерентабелен из-за слишком большого расхода энергии. Более эффективны для этой цели так называемые планетарные мельницы [1], но они сложны в изготовлении и эксплуатации.

В ООО «НПО Активация» (г. Балашиха Московской обл.) разработан *активатор с кольцевой рабочей камерой*, позволяющий измельчать цемент производительностью 0,5–5 т/ч; расход электроэнергии при этом составляет 6–8 кВт·ч на 1 т, в то время как у шаровых мельниц этот показатель составляет около 50 кВт·ч, а у дезинтеграторов 20–50 кВт·ч.

Устройствами, способными измельчать ПЦ до наносостояния, причем с еще меньшими энергозатратами и достаточно простыми в изготовлении, являются так называемые *аппараты вихревого слоя* (АВС), изобретенные в нашей стране Д.Д. Логвиненко еще в 1965 г. (авторское свидетельство на изобретение № 168264 «Реактор для проведения процессов в кипящем слое»). С той поры АВС изготавливались в единичных экземплярах в некоторых городах СССР, потом в России и на Украине, но только в наши дни началось их систематическое изготовление в г. Нижний Новгород на ООО «Регионметранс».

Как известно, измельченный до тонкого состояния ПЦ при контакте с атмосферой быстро теряет актив-

ность, поэтому он непригоден для дальних перевозок и длительного хранения. Его целесообразно использовать сразу же после изготовления, например на заводах сборного железобетона. АВС «по карману» любому такому предприятию.

Технологию изготовления «долгоживущего» наноцемента (патент WO 2014148944 A1 «Способ производства наноцемента и наноцемент») разработал коллектив ученых под руководством д-ра хим. наук М.Я. Бикбау. Способ производства такого наноцемента включает механохимическую активацию зерен ПЦ в присутствии полимерного модификатора, минеральной кремнеземистой добавки, содержащей диоксид кремния, и гипсового камня. При этом формируются сплошные нанооболочки-капсулы толщиной 20–100 нм на зернах ПЦ. Механохимическую активацию ПЦ совмещают с измельчением материалов до удельной поверхности 300–900 м<sup>2</sup>/кг и осуществляют в шаровой мельнице, а наноцемент получают указанным способом при следующем соотношении исходных компонентов, мас. %: портландцемент или портландцементный клинкер 30–90; гипсовый камень 0,3–6; полимерный модификатор 0,6–2; кремнеземистая добавка – остальное. Отметим также исключительную роль М.Я. Бикбау в разработке национального предстандарта ПНСТ 19–2014 «Портландцемент наномодифицированный. Технические условия», позволяющий предприятиям Российской Федерации применять такие цементы. Данный стандарт разработан на основании обобщения результатов многолетнего изучения технологии использования такого цемента и его свойств.

Предварительный национальный стандарт разработан для того, чтобы обеспечить широкое промышленное внедрение общестроительного наноцемента, изготовленного на основе модифицированного ПЦ.

В таком НЦ содержание дорогой клинкерной части снижено до 30 мас. % за счет замещения ее дешевыми минеральными добавками (шлаками, золами-уноса,

мелкозернистыми песками) с сохранением высоких строительно-технических свойств цемента. Более того, прочность бетонов из таких цементов соответствует классам 72,5–82,5.

При производстве таких цементов удельные затраты топлива снижаются в 2–3 раза, соответственно уменьшается количество выбрасываемых оксидов углерода, серы, азота. Разработанная технология модифицирования ПЦ может быть реализована на любом цементном заводе или на предприятии по производству бетона, бетонных и железобетонных конструкций и изделий, даже на крупных стройках.

Технология нанокапсуляции [2], также разработанная М.Я. Бикбау, предусматривает механохимическую активацию дисперсий частиц цемента, покрываемых модификатором. На поверхности клинкерного ядра-носителя в процессе нанокапсуляции формируется слоистая наноболочка предположительно состава  $C_{10}H_7SO_3Ca$ .

Второй способ получения НЦ – введение в обычный ПЦ наночастиц различной химической природы. Первой из частиц, влияние которой на ПЦ было изучено, стал фуллерен<sup>60</sup> – самая известная частица (открытие фуллерена<sup>60</sup> было удостоено Нобелевской премии). Несмотря на высокую активность фуллерена<sup>60</sup> по отношению к ПЦ, его использование в настоящее время нереально: он слишком дорог для применения в цементных смесях.

Второй в хронологическом порядке наночастицей, изученной в контексте ее поведения в цементных смесях, были астралены, открытые исследователем из Санкт-Петербурга профессором А.Н. Пономаревым с сотрудниками. Астралены представляют собой многослойные полиэдральные наночастицы фуллероидного типа [3]. Производство частиц налажено Научно-техническим центром прикладных нанотехнологий.

Астралены производятся в нескольких модификациях. Для цементных смесей разработан и производится Астрален-С. Введение этого материала в количестве  $10^{-3}$ – $10^{-4}\%$  по отношению к ПЦ приводит к росту в цементном камне протяженных структур длиной в сотни микрометров. Их появление не что иное, как микродисперсное самоармирование цементной матрицы, что приводит к заметному повышению физико-механических характеристик конструкций – как из тяжелого бетона, так и из пенобетона.

Третьей в хронологической последовательности наночастицей оказалась углеродная нанотрубка. Эти наночастицы широко используются в отечественной и зарубежной строительной индустрии [4–5].

Согласно исследованиям Б.В. Гусева с сотрудниками [6], значительное повышение прочности бетона может быть достигнуто за счет использования дисперсий углеродных нанотрубок, полученных по технологии их гидродинамического кавитационного диспергирования в водной среде в присутствии поликарбоксилатного гиперпластификатора. Появление дополнительных центров кристаллизации на поверхности трубок способствует ускорению процессов гидратации, упорядочивает поровую структуру пенобетона.

Научно-образовательным центром химической физики и мезоскопии Удмуртского научного центра Уральского отделения РАН и научно-инновационным центром ОАО «Ижевский электромеханический завод «Купол» разработан способ получения углеродных металлосодержащих наноструктур на основе оксидов 3d металлов, а также отходов металлургических производств в матрице из поливинилового спирта.

Введение таких частиц в цементные смеси, предназначенные для получения пенобетона, в количествах 0,05–0,001% по отношению к ПЦ обеспечивает повышение прочности и трещиностойкости пенобетона в 2–2,5 раза, причем прирост прочности за первые сутки

составляет до 50%. Теплоизоляционная способность пенобетона возрастает в 1,2 раза, морозостойкость – в 2 раза [7].

Завод «Купол» производит эти наночастицы в промышленных масштабах.

Необычным источником наночастиц, пригодных для повышения физико-химических характеристик конструкций и изделий из ПЦ, являются, согласно утверждению д-ра техн. наук С.Ф. Кореньковой [8], шламы, образующиеся в процессах очистки, умягчения воды, особенно на тепловых электростанциях. В этих шламах обнаружены наночастицы размером 40–50 нм, что позволяет относить их к нанотехногенному сырью.

Наночастицы также содержатся в шламах, образующихся при нейтрализации известью сточных вод из гальванических ванн. Авторами установлено, что введение таких шламов в цементные смеси обеспечивает улучшение физико-химических свойств изготовленных из таких смесей изделий.

Специалистами Тамбовского государственного технического университета совместно с ООО «Тамбовский инновационно-технологический центр машиностроения» и Тамбовским заводом «Комсомолец» разработано получение наночастиц способом газофазного химического осаждения в процессе каталитического пиролиза углеводородов, получивших название тауниты. По внешнему виду это нитевидные образования преимущественно цилиндрической формы с внутренним каналом, диаметр которого 3–8 нм. Наружный диаметр наночастицы 15–40 нм.

Установлено, что введение таунитов в цементные смеси в сверхмалых количествах (0,001–0,0001%) по отношению к ПЦ в 1,5–2 раза повышает механическую прочность бетонов.

В последние годы установлено, что пригодные для задач строителей наночастицы содержатся и в некоторых природных минералах. Один из самых удивительных – шунгит, в котором обнаружены фуллерены. Д-р техн. наук П.Г. Комохов разработал с использованием шунгита радиационноустойчивый бетон, пористость которого значительно меньше пористости традиционных бетонов [9]. Этот эффект объясняется влиянием фуллерена.

Малое инновационное предприятие «Нанокompозит-БГИТА» (Брянск) производит на основе шунгита полифункциональную нанодисперсную добавку для бетонов и растворов, представляющую собой жидкость темного серого цвета с массовой долей сухого вещества 1–3%. Добавку следует вводить в количестве 1–10% от массы ПЦ. Результат действия добавки на физико-технические характеристики бетонов и растворов:

- увеличение скорости твердения в 1,5–2 раза;
- снижение пористости на 15–20%;
- повышение прочности в 1,5–2 раза;
- снижение истираемости в 3,5–4 раза;
- снижение водопоглощения в 2–2,5 раза;
- повышение морозостойкости в 1,5–2 раза;
- снижение энергоемкости производства конструкций и изделий из бетона и раствора на 50–80% за счет сокращения времени тепловлажностной обработки.

Утверждается, что другой природный минерал – асбест – содержит неуглеродные нанотрубки. Их наличие и есть один из факторов, придающих изделиям из асбестоцемента такие выдающиеся свойства.

В настоящее время наиболее широко используемой в цементных смесях нанодобавкой является микрокремнезем – вещество, образующееся как побочный продукт при получении элементарного кремния и кремнийсодержащих сплавов. Создание сверхпрочных и долговечных бетонов, как правило, реализуется с использованием этого вещества.

Исследователями Казанского государственного архитектурно-строительного университета установлена четко выраженная, демонстрирующая общий характер зависимости технологических и эксплуатационных характеристик строительных материалов, в том числе и нанобетона, от концентрации нанодобавок [10]. Наибольший эффект добавок проявляется при 0,001–0,01 мас. %.

Третий способ получения нанобетонов – синтез наночастиц непосредственно в бетонных смесях. В настоящее время синтезом получают в основном наночастицы диоксида кремния [11]. При этом их размер оказывается меньшим, чем размер частиц микрокремнезема, поэтому эффективность может быть значительнее выше.

Исходные вещества для такого синтеза получили название прекурсоров. Для синтеза диоксида кремния ис-

пользуют преимущественно этилсиликаты. Сам процесс синтеза называется золь-гель-технологией.

Авторами настоящей статьи установлено, что еще более эффективные частицы диоксида кремния можно получить при предварительном введении этилсиликатов в поливинилацетатную дисперсию с последующим введением в цементную смесь [12]. Такие смеси авторы рекомендуют использовать прежде всего в качестве цементных клеев, для изготовления водо- и маслостойких покрытий полов.

Значительные успехи исследователей в сфере наномодификации бетонов очевидны, что обуславливает необходимость не только осуществления развернутой классификации методов и способов производства нанобетонов, но и выработки точной терминологии в описании технологических процессов.

#### Список литературы

1. Черник Г., Фокина Е., Будим Н., Хюллер М., Кочнев В. Измельчение и механическое легирование в планетарных мельницах // *Наноиндустрия*. 2007. № 5. С. 32–35.
2. Бикбау М.Я. Открытие явления нанокапсуляции дисперсных веществ // *Вестник Российской академии естественных наук. Серия Физика*. 2012. № 3. С. 27–35.
3. Пономарев А.Н. Развитие прикладных нанотехнологий в России // *Наноиндустрия*. 2012. № 8. С. 6–10.
4. Яковлев Г.И., Первущин Г.Н., Корженко А.Н., Бурьянов А.Ф., Пудов И.А., Лушникова А.А. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками // *Строительные материалы*. 2011. № 2. С. 47–51.
5. Shah S.P., Hou P., Konsta-Gdoutos M.S. Nano-modification of cementitious material: toward a stronger and durable concrete // *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2015. Vol. 2. Iss. 5. Pp. 67–78. ([https://www.researchgate.net/publication/283913691\\_Nanomodification\\_of\\_cementitious\\_material\\_toward\\_a\\_stronger\\_and\\_durable\\_concrete](https://www.researchgate.net/publication/283913691_Nanomodification_of_cementitious_material_toward_a_stronger_and_durable_concrete), date of access 07.08.2016).
6. Гусев Б.В., Петрунин С.Ю. Кавитационное диспергирование углеродных нанотрубок и модифицирование цементных систем // *Нанотехнологии в строительстве: Научный интернет-журнал*. Т. 6. № 6. С. 50–57. ([http://nanobuild.ru/ru\\_RU/nanobuild-6-2014-pages-15-19/](http://nanobuild.ru/ru_RU/nanobuild-6-2014-pages-15-19/), date of access 07.08.2016).
7. Кодолов В.И., Тринеева В.В., Васильченко Ю.М., Захаров А.А. Производство и использование металлуглеродных наноконструкций // *Наноиндустрия*. 2011. № 3. С. 24–26.
8. Коренькова С.Ф., Сидоренко Ю.В. Карбонатно-кремнеземистое техногенное сырье в материалах общестроительного назначения // *Успехи современного естествознания*. 2014. № 3. С. 172–176.
9. Комохов П.Г., Александров Н.И. Наноструктурированный радиационноустойчивый бетон и его универсальность // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2008. № 5. С. 38–40.
10. Хозин В.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов // *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 25–28.
11. Гусев Б.В., Минсандров И.Н., Мироевский П.В. Исследование процессов наноструктурирования в мелкозернистых бетонах с добавкой наночастиц диоксида кремния // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2009. Т. 1. № 3. С. 34–37. ([http://nanobuild.ru/ru\\_RU/journal/Nanobuild\\_3\\_2009\\_RUS.pdf](http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_3_2009_RUS.pdf)).
12. Войтович В.А., Хряпченкова И.Н. Роль нанотехнологий в повышении качества и долговечности кирпичной кладки // *Строительные материалы*. 2015. № 12. С. 54–56.

#### References

1. Chernik G., Fokina E., Budim N., Khyuller M., Kochnev V. Grinding and mechanical alloying in a planetary mill. *Nanoindustriya*. 2007. No. 5, pp. 32–35. (In Russian).
2. Bikbau M.Ya. The discovery of nano encapsulation particulate matter. *Vestnik Rossiiskoy akademii estestvennykh nauk. Seriya Fizika*. 2012. No. 3, pp. 27–35. (In Russian).
3. Ponomarev A.N. Development of applied nanotechnology in Russia. *Nanoindustriya*. 2012. No. 8, pp. 6–10. (In Russian).
4. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Korzenko A.N., Bur'yanov A.F., Pudov I.A., Lushnikova A.A. Modification of Cement Concretes with Multilayer Carbon Nanotubes. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 2, pp. 47–51. (In Russian).
5. Shah S.P., Hou P., Konsta-Gdoutos M.S. Nano-modification of cementitious material: toward a stronger and durable concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2015. Vol. 2. Iss. 5, pp. 67–78. ([https://www.researchgate.net/publication/283913691\\_Nanomodification\\_of\\_cementitious\\_material\\_toward\\_a\\_stronger\\_and\\_durable\\_concrete](https://www.researchgate.net/publication/283913691_Nanomodification_of_cementitious_material_toward_a_stronger_and_durable_concrete), date of access 07.08.2016).
6. Gusev B.V., Petrunin S.Yu. Cavitation dispersion of carbon nanotubes and modifying cement systems. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyi internet-zhurnal*. Vol. 6, No. 6, pp. 50–57. ([http://nanobuild.ru/ru\\_RU/nanobuild-6-2014-pages-15-19/](http://nanobuild.ru/ru_RU/nanobuild-6-2014-pages-15-19/), date of access 07.08.2016). (In Russian).
7. Kodolov V.I., Trineeva V.V., Vasil'chenko Yu.M., Zakharov A.A. The production and use of carbon-metal nanocomposites. *Nanoindustriya*. 2011. No. 3, pp. 24–26. (In Russian).
8. Koren'kova S.F., Sidorenko Yu.V. The carbonate-siliceous man-made raw materials in general construction purposes. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2014. No. 3, pp. 172–176. (In Russian).
9. Komokhov P.G., Aleksandrov N.I. Nanostructured radiation-resistant concrete and its universality. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2008. No. 5, pp. 38–40. (In Russian).
10. Khozin V.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K. Common Concentration Pattern of Effects of Construction Materials Nanomodification. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 2, pp. 25–28. (In Russian).
11. Gusev B.V., Minsandrov I.N., Miroevskii P.V. Research nanostructuring processes in the fine-grained concrete with the addition of silica nanoparticles. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyi internet-zhurnal*. Vol. 1, No. 3, pp. 34–37. ([http://nanobuild.ru/ru\\_RU/journal/Nanobuild\\_3\\_2009\\_RUS.pdf](http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_3_2009_RUS.pdf), date of access 07.08.2016). (In Russian).
12. Voitovich V.A., Khrypchenkova I.N. The Role of Nano-Technologies in Improving the Quality and Durability of Brick Masonry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 12, pp. 54–56. (In Russian).

Т.А. ДРОЗДЮК, инженер (t.drozdyuk@narfu.ru), А.М. АЙЗЕНШТАДТ, д-р хим. наук (a.isenshtadt@narfu.ru), М.А. ФРОЛОВА, канд. хим. наук, А.А. НОСУЛЯ, студент

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова (163002, Архангельск, наб. Северной Двины, 17)

## Оценка активности минерального связующего на основе сапонитсодержащего материала

Рассмотрена связующая способность экологически безвредного высокодисперсного сапонитсодержащего отхода (ССО) обогащения кимберлитовых руд алмазодобывающей промышленности (месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова, Архангельская область), как вяжущего вещества для минераловатных теплоизоляционных материалов. Предложен экспресс-способ определения активности вяжущего (А) с помощью функциональной зависимости активности вяжущего от величины теплового эффекта реакции гидратации ( $\Delta H$ ). Полученная прямолинейная функциональная зависимость вида  $A=f(\Delta H)$  имеет высокий коэффициент достоверности аппроксимации ( $R^2=0,96$ ), что свидетельствует о взаимосвязи данных величин и практической применимости полученной зависимости для оценки качества вяжущих материалов. Результаты исследований связующей способности высокодисперсных образцов ССО, предварительно полученных путем измельчения на планетарной шаровой мельнице, показали, что наибольшее значение активности достигается при удельной поверхности ССО не менее  $800 \text{ см}^2/\text{г}$ .

**Ключевые слова:** сапонитсодержащий отход, минераловатная теплоизоляция, активность вяжущего, тепловой эффект реакции гидратации.

T.A. DROZDYUK, Engineer (t.drozdyuk@narfu.ru), A.M. AIZENSHTADT, Doctor of Sciences (Chemistry) (a.isenshtadt@narfu.ru), M.A. FROLOVA, Candidate of Sciences (Chemistry), A.A. NOSULYA, Student  
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (17, Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation)

### Assessment of Activity of a Mineral Binder on the Basis of Saponite-Containing Material

A binding capacity of environment friendly high-disperse saponite-containing waste (SCW) of enrichment of kimberlite ores of the diamond-mining industry (the Lomonosov diamond mine, Arkhangelsk Oblast) as a binding substance for mineral wool heat insulating materials is analyzed. An express-method for determining the activity of a binder (A) with the help of the functional dependence of the binder activity on the value of heat effect of the hydration reaction is proposed. The rectilinear functional dependence of  $A=f(\Delta H)$  type obtained has a high coefficient of the approximation validity ( $R^2=0,96$ ) that testifies the interrelation of these values with practical applicability of the dependence obtained for assessing the binding materials quality. Results of the study of the binding capacity of high-disperse SCW samples preliminary obtained by grinding with a planetary ball mill show that the maximum value of the activity is reached when the specific surface of SCW not less than  $800 \text{ sm}^2/\text{g}$ .

**Keywords:** saponite-containing waste, mineral wool heat insulation, binder activity, heat effect of hydration reaction.

В работе [1] была показана возможность использования в качестве связующего для минераловатной теплоизоляции многотоннажного отхода горнодобывающих предприятий Архангельской области. Таким отходом являлся сапонитсодержащий материал (ССМ), выделенный методом электролитной коагуляции [2] из пульпы хвостохранилища промышленного обогащения кимберлитовых руд месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова (Архангельская область). Авторами данного исследования был получен опытный образец минераловатной теплоизоляции с использованием связующего на основе ССМ, испытания которого показали, что такой материал обладает хорошей теплоизолирующей способностью, является экологически безвредным, не подвергается окислительной деструкции и не разрушается при воздействии высокой температуры. Однако важной физико-химической характеристикой теплоизоляции, влияющей на эксплуатационные свойства материала, является прочность связей на границе раздела фаз минерального композита, которая во многом обеспечивается качеством связующего. Исходя из классических положений химии вяжущих веществ качество, например, вяжущих на основе клинкерных минералов в первую очередь оценивается их активностью по стандартной методике. В случае нетрадиционного связующего, содержащего сапонит (до 63% [2]), данную характеристику определить стандартными методами невозможно. Вместе с тем наличие в составе ССМ химических соединений, содержащих (в пересчете на оксиды)  $\text{SiO}_2$  (52%);  $\text{MgO}$  (19%);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10%);  $\text{CaO}$  (4%), позволяет предположить возможность протекания реакции гидратации с образованием

гидросиликатов из сапонитсодержащего сырья, предварительно подвергнутого механоактивации (механическое диспергирование на шаровой мельнице до ультрадисперсного состояния) [3–6]. Поэтому предлагается оценивать связующие свойства ССМ путем calorиметрического определения величины теплового эффекта реакции гидратации [7]. Подтверждением правомочности данного подхода, по нашему мнению, могут являться исследования по определению функциональной взаимосвязи между активностью вяжущего на основе клинкерных минералов (определяемой стандартными методами) и величиной теплового эффекта реакции гидратации, ускоренно протекающей в условиях calorиметрических измерений.

Исходя из вышеизложенного целью исследований является выявление функциональной взаимосвязи между активностью вяжущего и величиной теплового эффекта реакции гидратации и оценка связующей способности сапонитсодержащего материала для минераловатной теплоизоляции при подборе оптимальных размерных характеристик ССМ.

Известно, что реакция гидратации клинкерных минералов протекает медленно в диффузионной области гетерогенной системы твердая фаза–вода и сопровождается положительным тепловым эффектом [8]. Ускоряет данный процесс принудительный отвод продуктов реакции от активной поверхности твердой фазы. Данный эффект достигается механическим перемешиванием реакционной системы. Кроме того, доминирующим фактором, увеличивающим скорость взаимодействия компонентов вяжущего с водой, является также значительный избыток жидкой фазы. Предварительны-

Таблица 1

Образец	Время помола, мин	Средний размер частиц, мкм	Содержание, %	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг
ССМ-1	15	1,44±1,7	74	595±30
		58,36±4,58	5	
ССМ-2	30	2,68±1,57	49	690±35
		59,5±23,5	14	
ССМ-3	45	1,27±0,65	91	798±40
ССМ-4	60	1,23±0,59	88	811±40

Таблица 2

Образец	m, г	K, кДж	Температура, °С		Δt, °С	-ΔH, кДж/кг
			начальная	через 2 ч от начала эксперимента		
ССМ	5,4	0,58	23,5	24,1	0,6	64±6
ССМ-1	5,09			24,8	1,3	148±15
ССМ-2	5,1			24,9	1,4	159±16
ССМ-3	5,04			25,1	1,6	184±18
ССМ-4	5,09			25,1	1,6	182±18

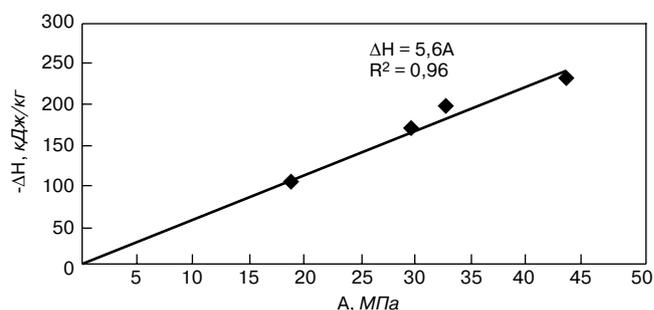
ми исследованиями установлен оптимальный режим калориметрических измерений тепловых эффектов реакции гидратации [9]: соотношение вода/твердая фаза – 20–25; принудительное перемешивание пробы в начальный период калориметрирования – 5–7 мин; общее время измерений – 2 ч.

Для достижения поставленной цели было отобрано четыре образца цемента различных марок: савинский цемент (Цем 1), мордовцемент (Цем 2 и Цем 3) и пикалевский цемент (Цем 4). Пикалевский цемент является быстротвердеющим портландцементом с минеральными добавками от 6 до 20%, савинский цемент – цемент марки М300 нормальноотвердеющий и мордовцемент – нормальноотвердеющий портландцемент класса прочности 32,5 и 42,5 соответственно.

Сапонитсодержащий материал был выделен из суспензии оборотной воды путем электролитной коагуляции, основанной на переводе высокодисперсных частиц твердой фазы в состояние, близкое к изоэлектрическому при добавлении в исходную суспензию оптимального количества раствора хлорида магния.

Активность образцов цемента определяли в соответствии с ГОСТ 310.4–81 по прочности при сжатии и изгибе стандартных образцов размером 40×40×160 мм, изготовленных из цементно-песчаного раствора состава 1:3 нормальной консистенции, после 28 сут твердения в стандартных условиях. Предел прочности при сжатии цемента вычисляли по результатам шести испытаний как среднее арифметическое четырех наибольших результатов.

Полученный сапонитсодержащий материал высушивали и доводили до постоянной массы при температуре 105°С. Далее получали образцы ССМ-1, ССМ-2, ССМ-3 и ССМ-4 путем измельчения на планетарной шаровой мельнице Retsch PM100, применяя сухой способ механического диспергирования, в течение 15, 30, 45 и 60 мин соответственно. Использовали следующие режимные параметры работы размольного аппарата: 25 размольных карбид-вольфрамовых тел диаметром 20 мм, скорость вращения ротора 420 об/мин. Данные режимы диспергирования позволили получить устойчивые воспроизводимые результаты размерных характеристик ССМ. Размер частиц определяли на анализаторе субмикронных частиц и дзета-потенциала Delsa Nano Series Zeta Potential and Submicron Particle Size Analyzers (Delsa Nano) методом измерения динамиче-



Функциональная зависимость величины теплового эффекта реакции гидратации от активности вяжущего

ского и электрофоретического светорассеяния. Определение удельной поверхности полученных образцов ССМ проводили методом воздухопроницаемости на приборе Товарава.

Термохимические исследования, связанные с измерениями тепловых эффектов, проводили калориметрическим методом на установке «Эксперт001К-2», причем для механоактивированных образцов ССМ измерения проводились непосредственно после их помола. В предварительных экспериментах устанавливалась постоянная калориметрической системы (k) путем введения определенной навески (2,504 г) соли хлорида калия (k=580 Дж/К). Для определения удельной теплоты гидратации опытных образцов ССМ и цементов использовалась навеска сухого образца массой 4–5 г. Объем дистиллированной воды во внутренней камере калориметра равнялся 100 мл. Ввод анализируемой пробы сухого порошка в калориметрическую систему осуществлялся при принудительном механическом перемешивании реакционной смеси магнитной мешалкой. После ввода соответствующей навески сухой пробы механическое перемешивание полученной суспензии продолжалось в течение 5 мин. Калориметрические измерения (заключительный период) проводились в течение двух часов, причем время предварительного периода измерений температуры системы колебалось от 10 до 15 мин. Изменение температурного режима реакционной смеси фиксировалось с точностью до 0,1°С.

Размерные характеристики и удельная площадь поверхности высокодисперсных образцов ССМ, полученных с разной продолжительностью помола, пред-

ставлены в табл. 1. Следует отметить, что при времени помола 15 и 30 мин отмечается выделение двух основных размерных фракций, сумма которых составляет всего 79 и 64% соответственно. Установленная высокая полидисперсность полученных образцов материала в данных режимах диспергирования не позволяет использовать полученные системы в качестве опытных образцов. Вместе с тем при времени помола 45 и 60 мин достигаются достаточно узкие фракции, содержание которых в высокодисперсных системах составляет практически 90%.

Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают, что выбранные условия механического диспергирования позволяют получить ультрадисперсный материал твердой фазы при минимальном времени помола (45 мин). Максимальная степень дисперсности ССМ достигается при 45 мин работы размольного аппарата, причем дальнейшее увеличение времени механоактивации не приводит к увеличению удельной поверхности (уменьшению размерных характеристик) образцов твердой фазы.

Результаты калориметрического определения удельной теплоты гидратации ( $\Delta H$ ) анализируемых проб ССМ представлены в табл. 2. Определенная теплота гидратации (за 2 ч) для образцов ССМ, отобранных после проведения механоактивации в течение 45 и 60 мин, сопоставима со значением удельной теплоты гидратации основного клинкерного минерала (двухкальциевого силиката  $\beta - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) – 260 кДж/кг.

#### Список литературы

1. Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Тутыгин А.С., Фролова М.А. Неорганическое связующее для минераловатной теплоизоляции // *Строительные материалы*. 2015. № 5. С. 86–89.
2. Тутыгин А.С., Айзенштадт М.А., Айзенштадт А.М., Махова Т.А. Влияние природы электролита на процесс коагуляции сапонитсодержащей суспензии // *Геоэкология*. 2012. № 5. С. 379–383.
3. Лесовик В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса. М.: АСВ, 2006. 526 с.
4. Глезер А.М. Аморфные и нанокристаллические структуры: сходство, различия, взаимные переходы // *Российский химический журнал*. 2002. Т. XLVI. № 5. С. 57–63.
5. Строкова В.В., Череватова А.В., Жерновский И.В., Войтович Е.В. Особенности фазообразования в композиционном наноструктурированном гипсовом вяжущем // *Строительные материалы*. 2012. № 7. С. 9–12.
6. Вешнякова Л.А., Айзенштадт А.М. Оптимизация гранулометрического состава смесей для получения мелкозернистых бетонов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 10. С. 19–22.
7. Лесовик В.С., Рахимбаев И.Ш. Расчет и уточнение термодинамических свойств высокоосновного гидросиликата кальция // *Вестник БГТУ*. 2011. № 3. С. 108–110.
8. Ушеров-Маршак А.В., Кабусь А.В. Калориметрический мониторинг ранних стадий твердения цементов в присутствии добавок // *Неорганические материалы*. 2013. Т. 49. № 4. С. 449–452.
9. Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Тутыгин А.С. Отходы горнодобывающей промышленности как связующее вещество для минеральной теплоизоляции: *Материалы международных научных E-симпозиумов «Технические и естественные науки: теория и практика»*. М., 2015. С. 203–214.

На рисунке представлена зависимость рассчитанного по экспериментальным данным теплового эффекта реакции гидратации испытуемых проб цемента ( $\Delta H$ ) от активности вяжущего (А), определенной стандартным методом, которая имеет прямолинейный характер и описывается уравнением прямой линии с коэффициентом достоверности аппроксимации  $R=0,96$ .

Полученная функциональная взаимосвязь (см. рисунок) свидетельствует о корректности оценки активности вяжущего по применяемой калориметрической методике измерений тепловых эффектов реакции гидратации. Используя полученную функциональную зависимость, авторами рассчитана активность как связующего опытных проб ССМ, которая для ССМ-3 и ССМ-4 максимальна и равна 32,86 МПа.

#### Выводы.

1. Предлагаемая методика калориметрических измерений тепловых эффектов реакции гидратации может быть использована для экспресс-оценки активности вяжущих веществ.

2. Сапонитсодержащий материал благодаря своему химическому составу проявляет связующую активность, причем данное свойство материала значительно усиливается после механоактивации сырья. Наиболее предпочтительно использовать сапонитсодержащий материал в качестве связующего в ультрадисперсном состоянии при величине удельной поверхности не ниже  $800 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

#### References

1. Drozdzyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Tutygin A.S., Frolova M.A. Inorganic binding agents for mineral wool heat insulation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 5, pp. 86–89. (In Russian).
2. Tutygin A.S., Aisenstadt M.A., Aisenstadt A.M., Makhova T.A. Influence of the nature of the electrolyte in the coagulation process saponite-containing slurry. *Geoekologiya*. 2012. No. 5, pp. 379–383. (In Russian).
3. Lesovik V.S. Povysheniye effektivnosti proizvodstva stroitel'nykh materialov s uchetom genezisa [Improving the efficiency of the production of building materials with regard to the genesis]. Moscow: Publishing House of the Association building universities. 2006. 526 p.
4. Glaser A.M. Amorphous and nanocrystalline structures: similarities, differences, mutual transitions. *Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal*. 2002. No. 5, pp. 57–63. (In Russian).
5. Strokovaya V.V., Cherevatova A.V., Zhernovskiy I.V., Voitovich E.V. Features of phase formation in the composite nanostructured gypsum binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 7, pp. 9–12. (In Russian).
6. Veshnyakova L.A., A.M. Ayzenshtadt. Optimizing the particle size distribution of the mixture to obtain fine-grained concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2012. No. 10, pp. 19–22. (In Russian).
7. V.S. Lesovik, I. Sh. Rakhimbaev. Calculation and clarifying the thermodynamic properties of highly basic calcium silicate. *Vestnik BGTU*. 2011. No. 3, pp. 108–110. (In Russian).
8. Usherov-Marshak A.V., Kabus A.V. Calorimetric monitoring the early stages of hardening of cements in the presence of additives. *Neorganicheskie materialy*. 2013. Vol. 49. No. 4, pp. 449–452. (In Russian).
9. Drozdzyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Tutygin A.S. Waste of mining industry as a binder for the mineral insulation. *Materials of international scientific E-symposiums "Technical and science: theory and practice"*. Moscow. 2015, pp. 203–214. (In Russian).

УДК 625.861

А.В. КОЧЕТКОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук (soni\_81@mail.ru); Ш.Н. ВАЛИЕВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук;  
С.Ю. АНДРОНОВ<sup>3</sup>, канд. техн. наук; Д.А. КЛИМОВ<sup>4</sup>, инженер

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет

(Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29)

<sup>2</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)  
(125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64)

<sup>3</sup> Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. (410054, Саратов, ул. Политехническая, 77)

<sup>4</sup> Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)

## Методы определения теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов

Проект отраслевого дорожного методического документа разработан Федеральным автономным учреждением РОСДОРНИИ. Проект устанавливает рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов при исследовании возможного диапазона изменения влажности, плотности и температуры материалов и грунтов, расположенных в дорожных конструкциях в районах сезонного промерзания (оттаивания) автомобильных дорог и искусственных сооружений на них, выбора методов измерения и приборов, обеспечивающих достоверные и воспроизводимые результаты определения теплофизических характеристик материалов дорожных одежд и грунтов земляного полотна.

**Ключевые слова:** теплофизические свойства, объемная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, коэффициент температуропроводности, теплоусвояемость, дисперсные материалы, грунты.

A.V. KOCHETKOV<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering); Sh.N. VALIYEV<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering);

S.Yu. ANDRONOV<sup>3</sup>, Candidate of Sciences (Engineering); D.A. KLIMOV<sup>4</sup>, Engineer

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Avenue, 614990, Perm, Russian Federation).

<sup>2</sup> Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI) (64, Leningradsky Avenue, 125319, Moscow, Russian Federation)

<sup>3</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77, Politekhnikeskaya Street, 410054, Saratov, Russian Federation)

<sup>4</sup> Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (87, Gorkogo Street, 600000, Vladimir, Russian Federation)

### Techniques of Determination of Heat-Physical Properties of Road-Building Materials and Soils

A draft industry road methodical document has been developed by the Federal Autonomous Institution ROSDORNII. The draft sets recommendations for determining heat-physical properties of road-building materials and soils when studying the possible range of changes in humidity, density, and temperature of materials and soils located in road constructions in areas of seasonal freezing (thawing) of motor roads and artificial structures on them, selection of measuring methods and instruments ensuring reliable and reproducible results of determination of heat-physical characteristics of road pavement materials and soils of the motorway subgrade.

**Keywords:** heat-physical properties, volumetric heat capacity, heat conductivity coefficient, heat diffusivity coefficient, heat comprehensibility, disperse materials, soils.

Согласно п. 5 ст. 18 Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» проектная документация здания или сооружения должна содержать пределы допустимых изменений параметров, характеризующих безопасность объектов и геологической среды в процессе строительства и эксплуатации.

В проектной документации может быть предусмотрена необходимость проведения в процессе строительства и эксплуатации проектируемого здания или сооружения мониторинга компонентов окружающей среды (в том числе состояния окружающих зданий и сооружений, попадающих в зону влияния строительства и эксплуатации проектируемого здания или сооружения), состояния основания, строительных конструкций и систем инженерно-технического обеспечения проектируемого здания или сооружения, сооружений инженерной защиты (1–3; СНиП II-3–79\* «Строительная теплотехника»; СНиП 23-02–2003 «Тепловая защита зданий»; СТО 218.3.001–2006 «Проектирование и устройство теплоизолирующих слоев из экструдированного пенополистирола STYROFOAM на автомобильных дорогах России»; ГОСТ 7076–99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме»; ГОСТ 30256–94 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом»; ГОСТ 30290–94 «Материалы и изделия строительные. Метод определе-

ния теплопроводности поверхностным преобразователем»; СП 23-101–2004 «Проектирование тепловой защиты зданий»).

Для оценки эксплуатационных показателей материалов дорожных одежд и глинистых грунтов земляного полотна рассматриваются: удельная теплоемкость  $C$ ; объемная теплоемкость  $C'$ ; теплопроводность  $\lambda$ ; коэффициент температуропроводности  $k = \lambda/C'$ .

Измерение удельной теплоемкости дорожно-строительных материалов регулируется ГОСТ 23250. Стандарт распространяется на строительные материалы и устанавливает метод определения их удельной теплоемкости в диапазоне 20–100°C. Метод определения удельной теплоемкости основан на измерении количества теплоты, отданной калориметру образцом известной массы, нагретым до заданной температуры. Данный метод является определяющим.

Метод является лабораторным, применим для сплошных и сыпучих материалов. Сплошные материалы перед измерением измельчают; измельченный материал засыпают и утрамбовывают в специальную измерительную капсулу. Методика требует высушить исследуемое вещество перед измерением до постоянной массы. Температуру сушки определяют видом материала, она не должна вызывать в нем деструктивных изменений. Масса исследуемого материала не менее 5 г.

Относительная погрешность определения удельной теплоемкости по данной методике не превышает 5%.

Данная погрешность является минимальной для всех табличных значений удельной теплоемкости, приведенных в строительных справочниках. Результаты экспериментального определения значений удельной теплоемкости материала асфальтобетонного покрытия в течение его жизненного цикла имеются в справочной и технической литературе. Например, пределы удельной теплоемкости от времени принимают значения от 975 до 1578 Дж/(кг·°С), в зависимости от условий эксплуатации дорожного покрытия и типа асфальтобетона.

Величина удельной теплоемкости может являться феноменологическим параметром для определения обоснованных сроков ремонтных мероприятий. Зависимость теплоемкости от времени существенная (за пять лет на 15%), определяется на основании результатов испытаний.

Рекомендуется учитывать, что время начала выполнения ремонтных работ  $t_p$  асфальтобетонного покрытия определяется моментом утраты квазилинейности графиками функции удельной теплоемкости от времени эксплуатации покрытия. При этом в начальный период эксплуатации покрытия вследствие продолжающихся процессов формирования структуры асфальтобетона происходит увеличение плотности асфальтобетона в дорожном покрытии и удельная теплоемкость убывает.

С учетом зависимости теплофизических характеристик дорожного покрытия от времени рекомендуется использовать мобильный контролер, который фиксирует изменение поверхностной теплопроводности асфальтобетонного покрытия.

Значения удельной теплоемкости используют для проведения расчетов при прогнозировании теплофизических режимов технологий дорожного строительства.

Качество большинства технологических процессов определяется их теплофизическим режимом. В условиях неопределенности теплофизического режима возникает риск утраты требуемого качества или простоя, что приводит к существенному повышению себестоимости работ. Например, из-за температурной неоднородности асфальтобетонных смесей при укладке недоуплотняется около 10% площади. По результатам прогнозирования влажностного режима грунтовых резервов на стадии разработки проекта производства работ удается повысить выработку до 50% и снизить себестоимость работ более чем на 20%.

Современное дорожное строительство предполагает непосредственную оценку свойств дорожно-строительных материалов и грунта на месте строительства. При этом учитывают особенности состава и фактуры материалов, используемых на месте производства работ [4–8].

В настоящее время действуют стандартные методы измерения теплопроводности для дорожно-строительных материалов [1–6]. Используют следующие методы определения теплопроводности:

- метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом по ГОСТ 30256, погрешность метода при доверительной вероятности 0,9 составляет 7%;
- импульсный метод определения теплопроводности поверхностным преобразователем применим в лабораторных и полевых условиях; недостаток метода: «разрушение» целостности образца, необходимого для установки зонда;
- метод определения теплопроводности поверхностным преобразователем заключается в создании одностороннего кратковременного теплового импульса на поверхности изделия и регистрации изменения температуры на этой поверхности. Стандарт не распространяется на многослойные изделия. Погрешность определения теплопроводности составляет не более 7%;
- метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме по ГОСТ 7076; стандарт не распространяется на материалы и изделия с теплопроводностью более 1,5 Вт/(м·К).

При установлении требований к образцам, прибору и его градуировке приняты две основные схемы испытания: асимметричная (с одним тепломером) и симметричная (с двумя тепломерами).

Основные характеристики стандартных методов приведены в табл. 1. Согласно табл. 1 измерение влажных материалов в широком диапазоне температуры может быть выполнено методом цилиндрического зонда с разрушением целостности образца. Погрешность метода до 7%.

Отмечают узкий диапазон допустимых значений теплопроводности – до 2 Вт/(м·К).

Если рассмотреть диапазон изменения теплопроводности материалов, используемых в дорожном строительстве (согласно СТО 218.3.001–2006, табл. 2.1), то предел в 2 Вт/(м·К) является недостаточным.

В табл. 1 приведены показатели теплопроводности в зависимости от метода ее измерения.

Среди современных методов определения теплопроводности дорожно-строительных материалов и грунтов следует выделить методы начальной стадии теплового процесса; методы регулярного режима первого рода; методы регулярного режима второго рода; методы температурных волн; методы монотонного режима; нестационарные методы (импульсный и мгновенного источника теплоты).

**Таблица 1**

Параметры	ГОСТ 30256	ГОСТ 30290	ГОСТ 7076
Тепловой режим	Нестационарный тепловой режим. Нагреваемый цилиндрический зонд	Импульсный тепловой поток. Поверхностный преобразователь	Стационарный тепловой поток. Тепломер
Диапазон теплопроводности материала	0,01–2 Вт/(м·К)	0,02–1 Вт/(м·К)	не более 1,5 Вт/(м·К)
Диапазон значений температуры	90–573 К (183–200°С)	278–313 К (5–40°С)	233–293 К (40–200°С)
Требование к влажности образца	нет	нет	да
Сыпучие образцы	да	да	да
Разрушение целостности образца	да	нет	нет
Погрешность метода, %	Более 7	Не более 7	Не превышает 3 при строгом соблюдении условий
Полевые условия (передвижная лаборатория)	да	да	да

Приборы с горячей плоской плитой, снабженной охранным кольцом для адиабатизации боковых поверхностей, применяются в качестве первичных приборов для определения теплопроводности теплоизоляционных материалов.

Использованный в этих приборах метод был принят в качестве стандартного в 1954 г. Международным объединением лабораторий испытаний строительных материалов (RILEM). Возможны варианты расположения горячей плиты между двумя холодными. Возможно использование центрального нагревателя и цилиндрического исследуемого образца. Приборы изготавливаются с нагревательными элементами, равномерно распределенными по площади квадратной, круглой или прямоугольной пластины и выполненными в виде линейного источника тепла.

*Подготовка образцов грунта к эксперименту.* Материал вырезают по изотермической поверхности. Образцы мерзлого грунта с места отбора доставляют в специальных термостатированных контейнерах с целью сохранения ненарушенной структуры согласно нормативной документации. Температура в термостатирующем контейнере должна соответствовать температуре, при которой залегал грунт в месте отбора образца. По прибытии в лабораторию образцы грунта хранят в морозильной камере при постоянной температуре, соответствующей условиям их залегания.

Исследуемый образец мерзлого грунта ненарушенной структуры представляет собой, например, суглинок суммарной влажностью 0,3 д. е. и плотностью 1880 кг/м<sup>3</sup>. Проводят серию измерений на трех установках в одинаковых условиях в диапазоне  $-10 - +20^{\circ}\text{C}$ .

Выполняют подготовку экспериментальной установки для проведения исследований. В отведенный промежуток времени для проверки прибора и увеличения точности измерений производят тарирование экспериментальной установки, которое также может быть произведено в случае, если имеются сомнения в достоверности показаний прибора. Тарирование производят по аналогичной схеме с экспериментом, роль исследуемого образца выступает эталонный образец с известным коэффициентом теплопроводности, определенным заранее с высокой точностью. Проводят серию замеров с применением различных комбинаций эталонных образцов, и по результатам строится тарировочная зависимость угла поворота реохорда от соотношения между исследуемым и эталонным образцами. Минимальные и максимальные значения коэффициентов теплопроводности эталонов, применяемых при тарировании, ограничивают диапазон измерения прибора.

Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта измеряют только до  $-6^{\circ}\text{C}$ . Это связано с тем, что нагревательные элементы при температуре выше, чем  $-6^{\circ}\text{C}$ , перегревают испытуемый образец, что приводит к фазовому переходу и плавлению. В связи с особенностями прибора индикация данных невозможна, так как при фазовом переходе грунта происходит поглощение или выделение большого количества тепла, а чувствительные элементы прибора на это не рассчитаны.

Для комплексного определения теплофизических характеристик строительных материалов и изделий методом неразрушающего контроля используют методику Фокина—Чернышова [8] основанную на контактном измерении температуры на поверхности образца в виде призмы квадратного сечения. Разработано приборное и программное обеспечение для экспериментального определения коэффициента температуропроводности, объемной теплоемкости, теплопроводности строительных материалов и изделий, а также методические указания по проведению опытов.

Метод рекомендуется для экспериментального определения теплофизических характеристик бетона, цементного раствора и силикатного кирпича при различных условиях нагрева и охлаждения. Измерения проводят в двух точках: на ребре и в середине грани призмы. Определяемая характеристика — коэффициент температуропроводности материала.

*Особенности проведения эксперимента.* Жесткие требования к форме образца: призма квадратного сечения, длина грани призмы в шесть и более раз превышает ширину; необходимо тщательное крепление сплав термопар к образцу; требуется печь для нагрева образца.

Коэффициент теплопроводности или значение теплоемкости могут быть найдены в результате пересчета; погрешность измерений неоднородна: для материалов неоднородной структуры, например жаропрочного бетона, погрешность измерения температуропроводности достигает 7%; погрешность пересчета теплопроводности и теплоемкости составляет от 5 до 7%.

Методы линейного источника нагретой нити и оптического сканирования являются комплексными и позволяют определить три основные теплофизические характеристики материала: теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость. Возможности метода зависят от градуировки измерительной системы по образцам с заранее известными свойствами. Имеется возможность обнаружить и выделить анизотропию свойств в объеме образца. Точность методов не уступает известным и стандартизированным методам стационарного теплового потока, например в ГОСТ 25820.

Метод линейного источника относится к методам нестационарного теплового потока и требует внедрения датчика (нагретой нити) в образец. Нить является источником теплового потока и прибором температурных измерений. Достоинства метода определяются возможностью записи сигнала нити и последующей программно-вычислительной обработки полученных данных.

Метод оптического сканирования представляет собой метод измерения расплывания теплового пятна, созданного точечным источником излучения, например лазерным лучом. Точность метода зависит от возможности градуировки измерительной системы с использованием по образцам с заранее известными свойствами. Метод оптического сканирования рассматривают совместно с другими методами, в частности с методом линейного источника. Погрешность данных методов определяется трудностью проведения эксперимента и сложностью обработки экспериментальных данных. Точность методов не уступает традиционным и стандартизированным методам определения стационарного теплового потока, например отраженным в ГОСТ 25820.

Применение методов линейного источника и оптического сканирования позволяет существенно расширить диапазон измерения теплопроводности (до 6 Вт/(м·К) при сохранении высокой точности измерений).

В России проведена адаптация методов линейного источника и оптического сканирования применительно к задачам определения теплофизических свойств дисперсных пород. Методы позволяют работать с сухими и влагонасыщенными образцами. Главный недостаток этих методов — требование высокой научной квалификации персонала.

В настоящее время существуют хорошо разработанные методы экспериментального определения теплофизических свойств дорожных материалов и подстилающих грунтов. Погрешность данных методов определяется трудностью проведения эксперимента и сложностью обработки экспериментальных данных.

Теплопроводность строительных материалов в настоящее время определяется с погрешностью 3%, теплоемкость – 5%. Значительно сократилось время проведения эксперимента, увеличилась экономическая и технологическая эффективность за счет проведенных исследований.

Для определения теплофизических характеристик дисперсных материалов используются также новые методы и приборы [4–11]:

1. Методы определения теплоемкости дисперсных материалов:

- балансный метод (калориметр);
- метод адиабатического калориметра (калориметр с непрерывным вводом).

2. Стационарные методы определения коэффициента теплопроводности дисперсных материалов:

- абсолютные стационарные методы (определение коэффициента теплопроводности методом пластины);
- сферический метод определения теплопроводности образца;
- прибор для определения теплопроводности методом цилиндрического слоя).

3. Методы, основанные на регулярном тепловом режиме:

- методы акалориметров и лямбда-калориметров;
- методы двух и многих точек (установка для определения теплофизических характеристик по методу двух точек/многих точек);
- методы бикалориметров (шаровой бикалориметр со слабо развитым ядром/сильно развитым ядром; простой бикалориметр; цилиндрический бикалориметр).

4. Квазистационарные методы определения теплофизических характеристик дисперсных материалов.

5. Нестационарные методы определения теплофизических характеристик:

- схема установки Плотникова;
- изотермический плоский зонд;
- изотермический цилиндрический зонд;
- мгновенный плоский зонд;
- плоский зонд с мгновенным импульсом тепла;
- цилиндрический зонд постоянной мощности;
- шаровой зонд постоянной мощности и др.

Основным достоинством стационарных методов является высокая точность, так как на результат не влияет начальное распределение температуры в образце и теплоемкость датчиков. Стационарные методы наиболее приемлемы для исследования мерзлых грунтов, а также вблизи границы фазового перехода. Следует учитывать, что при измерениях влажных талых грунтов и возникновении температурного градиента начинает происходить миграция влаги к источнику холода.

Известно также большое количество установок по определению коэффициента теплопроводности, основанных на стационарном методе. Существенным недостатком установок, основанных на таком методе, является длительное время измерения: чем больше размер образца и меньше градиент температуры, тем ниже скорость измерений.

Нестационарные методы подразделяют: на измерения на начальной стадии теплового процесса; исключительно нестационарные; регулярного теплового режима; квазистационарные. Метод начальной стадии теплового процесса характеризуется значительным влиянием начальных и граничных условий исследования, свойств и размеров образца на получаемые результаты. Такие установки позволяют измерять целый комплекс теплофизических свойств материалов, и мерзлых грунтов в частности, за счет возможности задания небольшого градиента значений температуры.

К нестационарным методам можно отнести импульсный способ, способ мгновенного источника тепла. Импульсный метод базируется на скоростном самонагреве образца под воздействием импульса электрического тока и измерения изменения температуры в зависимости от времени нагрева. Развитие стало возможным в связи с появлением пирометрии высокоскоростного разрешения и быстродействующих АЦП.

Импульсные методы особенно перспективны для исследования теплоемкости и других теплофизических свойств в экстремальных условиях (вблизи точки плавления, в условиях теплового удара и т. д.), когда длительное поддержание системы на высоком температурном уровне представляет технически сложную задачу. При использовании импульсных методов принимают во внимание, что в силу резкого изменения температуры образца во времени они зачастую неприменимы для материалов с большим временем релаксации тепловых процессов, например полимеров. Эта особенность при возможности варьирования мощностью импульсов оказывается полезной при исследовании релаксационных процессов.

Метод регулярного теплового режима (автор Г.М. Кондратьев) основан на исследовании упорядоченного теплового процесса, когда распределение температуры для различных точек системы становится неизменным и не зависит от начальных условий. Метод заключается в определении темпа охлаждения (нагрева) образца, помещенного в среду с постоянной температурой [9].

Разработано значительное количество приборов по измерению коэффициента теплопроводности грунтов в талом и мерзлом состояниях. К достоинствам метода относят теоретическую обоснованность и возможность исследования образцов различных форм и размеров. К недостаткам относят трудоемкость вычисления искомого параметра и значительный объем необходимого оборудования. Квазистационарный тепловой метод основан на условии постоянства скорости теплового нагрева образца или теплового потока на его поверхности.

Эти методы относятся к скоростным и позволяют путем несложных вычислений находить искомые величины теплофизических свойств. Их разработкой занимались А.В. Лыков, Ю.А. Попов. Разработан метод с использованием подвижного точечного источника тепловой энергии, в качестве которого может применяться лазер.

Научное направление технологической теплофизики было создано академиком Н.Н. Рыкалинным. В его основу были положены усовершенствования математической теории теплообмена, в частности метода источников теплоты [10, 11].

В математической теплофизике используют метод Грина, его аналог в теплопроводности твердых тел – уравнение Кельвина – фундаментальное решение уравнения теплопроводности. Оно описывает изменение температуры в неограниченном твердом теле, происходящее после выделения конечного количества теплоты в виде мгновенного точечного источника. Тепловой процесс в неограниченном теле, вызванный источником теплоты любой формы и интенсивности, действующий постоянно или временно, движущийся или неподвижный, может быть изображен как комбинация температурных полей, создаваемых мгновенными точечными источниками теплоты. На практике различают три механизма распространения тепла: теплопроводность, конвекцию, и передачу тепла излучением. Технологическая теплофизика в силу особенностей технологических процессов основана на положениях теории теплопроводности.

**Таблица 2**  
**Характеристики физически сшитого пенополиэтилена**

Показатели сшитого пенополиэтилена	
Цвет	Молочно-белый
Толщина листа, мм	0,5–50
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	33 (±5), 66 (±5)
Рабочая температура, °С	-60 – +100
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), не более	0,031
Коэффициент теплопоглощения, Вт/(м·°С), не более	0,34
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па), не более	0,002–0,003
Индекс снижения ударного шума, дБ, не менее	18
Напряжение сжатия при 25% линейной деформации, МПа, не менее	0,035
Водопоглощение по объему при полном погружении 96 ч, не более, %	1
Удельная теплоемкость, °С, кДж/(кг·°С)	2

Уравнение теплопроводности для мгновенного точечного источника тепла с различными коэффициентами теплопроводности в различных направлениях [23]:

$$c\rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right); \quad (1)$$

тепловые потоки (количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади в направлении оси) через три плоскости, перпендикулярные координатным осям, будут равны (соотношения Фурье):

$$q_x = -\lambda_x \frac{\partial \Theta}{\partial x}; \quad q_y = -\lambda_y \frac{\partial \Theta}{\partial y}; \quad q_z = -\lambda_z \frac{\partial \Theta}{\partial z}, \quad (2)$$

где  $q$  – тепловой поток;  $\Theta$  – температура;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Закон Фурье показывает, что тепло распространяется от более высокой температуры к более низкой. Считают, что изменение температуры пропорционально изменению по координате и что решения можно суммировать.

В предположении, что теплопроводность во всех направлениях одинакова –  $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$ , уравнение теплопроводности для точечного мгновенного источника теплоты имеет вид:

$$c\rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

или при применении оператора:  $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \Delta$

имеем:  $c\rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \lambda \Delta \Theta$ . В упрощенном виде:  $\frac{\partial \Theta}{\partial t} = a \Delta \Theta$ .

В системе координат полупространства уравнение температуры имеет вид уравнения Кельвина:

$$\Theta(x, y, z, t) = \frac{q}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4at} \right],$$

где  $x, y, z$  – координаты точки измерения температуры относительно координат мгновенного точечного источника  $x', y', z'$ .

При интегрировании последнего уравнения:

$$\Theta(x, y, z) = \int_0^\infty \frac{q}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4at} \right] dt.$$

Используя типовые сокращения, получаем:

$$\Theta(x, y, z) = \frac{q}{4\pi\lambda r},$$

где  $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$ ,

знаменатель имеет следующий вид:  $q(x, y, z) = e^{-k\left(\frac{x}{R}\right)^2}$ .

В конечном виде для полупространства имеем:

$$\Theta(x, y, z, t) = \frac{q}{c\rho \left[ 4\pi a \left( t + \frac{R^2}{4ak} \right) \right]} \exp \left[ -\frac{r^2}{4a \left( t + \frac{R^2}{4ak} \right)} \right],$$

где  $k$  – коэффициент сосредоточенности.

Анализ научно-исследовательских работ, проводимых в РФ и за рубежом, позволяет отметить высокий уровень исследования теплофизических свойств теплоизоляционных материалов, применяемых в дорожном строительстве. Для широкого применения в дорожном хозяйстве рекомендуются материалы с улучшенными теплофизическими свойствами, в том числе пенопласты; полученные для них значения теплопроводности основаны на обработке большого массива опытных данных.

Теплопроводность пенопластов характеризуется вариативностью коэффициента теплопроводности для 45 марок различных производителей, от 0,032 до 0,035 Вт/м (СП 25.13330.2012 К).

Многолетние исследования показывают, что пенополистирол является достаточно стойким по отношению к действию влаги. За счет наличия закрытопористого строения водопоглощение пенополистирола составляет менее 0,2 об. %. Такое незначительное водопоглощение обеспечивает малое изменение теплопроводности во влажных условиях и составляет не более 0,002 Вт/(м·К). Это позволяет применять экструзионный пенополистирол без дополнительной гидроизоляции. Пренебрежимо мал коэффициент паропроницаемости (в зависимости от плотности материала – менее 0,02 мг/(м·ч·Па). С увеличением кажущейся плотности и при повышенных температурах проницаемость водяных паров в пенополистироле снижается.

Пенопласты подробно исследованы на морозостойкость. Даже после 1000 циклов замораживания-оттаивания изменение термического сопротивления материала не превышает 5%.

Результаты исследования теплофизических свойств пенопластов в зависимости от времени показывают, что за 20 лет эксплуатации теплопроводность образцов практически не изменилась.

Исследовалось влияние агрессивных сред (противогололедные реагенты) на теплофизические свойства пенопластов. Показано, что постоянство коэффициента теплопроводности при воздействии погодных-климатических факторов и агрессивных сред указывает на сохранение макроструктуры материала в процессе эксплуатации. Исследованы механические характеристики пенопластов: зависимость от вида, цикличности нагрузки, продолжительности воздействия в условиях неблагоприятных внешних факторов и т. д. Высокие современные требования к исследованию поведения материалов в условиях эксплуатации подчеркивают важность точного определения и формулировки требований к теплофизическим свойствам материалов дорожных одежд и подстилающего грунта.

Для широкого применения в дорожном хозяйстве в качестве материала с улучшенными теплофизическими свойствами и повышенным сроком службы также рекомендуется физически сшитый пенополиэтилен (табл. 2). Важным положительным свойством физически сшитого пенополиэтилена является то, что это материал химически инертный и экологически чистый, стоек к гниению и деструкции (расчетный срок его эксплуатации 25 лет), обладает высокой адгезией к грунтам и всем известным строительным материалам. Благодаря сшитой закрыто-ячеистой структуре пенополиэтилен имеет высокую эластичность и низкую остаточную деформацию.

**Список литературы**

1. Рекомендации по комплексному определению теплофизических характеристик строительных материалов. М.: Стройиздат, 1987. 30 с.
2. Методические рекомендации по опробованию и инженерной оценке меловых и мергелистых грунтов. Министерство транспортного строительства. Москва. 1985. 76 с.
3. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 1973. 191 с.
4. Бойков Г.П., Видин Ю.В., Фокин В.М. Определение теплофизических свойств строительных материалов. Красноярск: Изд-во Красноярского университета, 1992. 172 с.
5. Власов В.В. Автоматические устройства для определения теплофизических характеристик твердых материалов. М.: Машиностроение, 1977. 168 с.
6. Чернышова Т.И., Чернышов В.Н. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. М.: Машиностроение, 2001. 240 с.
7. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / Под ред. А.В. Лыкова. М.: Энергия, 1973. 336 с.
8. Фокин В.М., Чернышов В.Н. Теоретические основы определения температуропроводности строительных материалов методом неразрушающего контроля. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2004. Вып. 4-1. Т. 10. С. 936–945.
9. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: Гостехиздат, 1954. 408 с.
10. Барац Я.И., Маслякова И.А., Барац Ф.Я. Математические модели технологической теплофизики и физических взаимодействий. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. 92 с.
11. Овчинников И.Г., Аржанухина С.П., Кочетков А.В. Теоретические и правовые основы применения чистых противогололедных материалов на основе хлоридов кальция и натрия. *Дорожная держава*. 2009. № 16. С. 58–63.

**References**

1. Rekomendatsii po kompleksnomu opredeleniyu teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov [Recommendations for a comprehensive definition of thermal performance of building materials.]. Moscow: Stroyizdat. 1987. 30 p.
2. Metodicheskie rekomendatsii po oprobovaniyu i inzhenernoy otsenke melovykh i mergelistykh gruntov [Guidelines for testing and evaluation of engineering and chalk marl soils]. Moscow. 1985. 76 p.
3. Rukovodstvo po opredeleniyu fizicheskikh, teplofizicheskikh i mekhanicheskikh kharakteristik merzlykh gruntov [Guidelines for the determination of physical, thermal and mechanical characteristics of frozen soil]. Moscow: Stroyizdat. 1973. 191 p.

4. Boikov G.P., Vidin Yu.V., Fokin V.M. Opredelenie teplofizicheskikh svoystv stroitel'nykh materialov [Determination of thermal properties of building materials]. Krasnoyarsk: Publishing House of the University of Krasnoyarsk. 1992. 172 p.
5. Vlasov V.V. Avtomaticheskie ustroystva dlya opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik tverdykh materialov [Automatic device for determining the thermal characteristics of solid materials]. Moscow: Mashinostroenie. 1977. 168 p.
6. Chernyshova T.I., Chernyshov V.N. Metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov [Methods and tools for non-destructive testing of thermal properties of materials]. Moscow: Mashinostroenie. 2001. 240 p.
7. Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti [Methods for determination of thermal conductivity and thermal diffusivity.]. Ed. by Lykov A.V. Moscow: Energiya. 1973. 336 p.
8. Fokin V.M., Chernyshov V.N. Theoretical basis of determining the thermal diffusivity of building materials by non-destructive testing. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2004. Iss. 4–1. Vol. 10, pp. 936–945. (In Russian).
9. Kondrat'ev G.M. Regul'arnyi teplovoi rezhim [Regular thermal conditions]. Moscow: Gostekhizdat. 1954. 408 p.
10. Barats Ya.I., Maslyakova I.A., Barats F.Ya. Matematicheskie modeli tekhnologicheskoy teplofiziki i fizicheskikh vzaimodeistviy [Mathematical models of thermal physics and technology of physical interactions]. Saratov: Saratov State Technical University. 2002. 92 p.
11. Ovchinnikov I.G., Arzhanukhina S.P., Kochetkov A.V. Theoretical and legal basis for the use of net-icing materials based on calcium and sodium chlorides. *Dorozhnaya derzhava*. 2009. No. 16, pp. 58–63. (In Russian).



УДК 674.41

А.А. ЛУКАШ, канд. техн. наук (mr.luckasch@yandex.ru), Н.П. ЛУКУТЦОВА, д-р техн. наук  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» (241037, г. Брянск, просп. Ст. Димитрова, 3)

## Перспективность производства строительных материалов из древесины с ядровой гнилью

Обоснована перспективность переработки в строительные материалы древесины, содержащей ядровую гниль. Предметом исследований являются способы переработки древесины с ядровой гнилью. Дефицит твердолиственных и хвойных пород требует вовлечения в переработку неделовой древесины. Чаще всего древесину с ядровой гнилью распиливают на дрова и реализуют населению как топливо. Дифференциация подхода по выбору способа переработки древесины с ядровой гнилью заключается в обосновании вида получаемых материалов и изделий различного функционального назначения в зависимости от размеров ядровой гнили. Для обеспечения конкурентоспособности продукция, изготовленная из древесины с ядровой гнилью, должна обладать более высокими эксплуатационными показателями по сравнению с существующими материалами и изделиями. Поэтому способы получения должны быть связаны с конкретными материалами или изделиями. Лесоматериалы с ядровой гнилью диаметром до 50 мм наиболее целесообразно использовать для производства оцилиндрованных бревен. Для переработки древесины с ядровой гнилью диаметром 50–100 мм наилучшим способом будет лущение здоровой древесины и последующее склеивание фанерной продукции. Из древесины с ядровой гнилью диаметром 50 мм и выше также можно получать обрезные пиломатериалы небольших размеров (паллеты).

**Ключевые слова:** древесина, ядровая гниль, переработка, фанера, оцилиндрованные бревна, пороки.

A.A. LUKASH, Candidate of Sciences (Engineering), N.P. LUKUTTSOVA, Doctor of Sciences (Engineering)  
Bryansk State Engineering-Technological University (3, St. Dimitrova Avenue, 241037, Bryansk, Russian Federation)

### Perspectivity of Producing Building Materials from Wood with Heart Rot

The perspectivity of processing of wood containing the heart rot in building materials is substantiated. The subject of the study is methods for processing of wood with heart rot. The shortage of hardwood and softwood demands to treat the unmerchantable wood. Most often, wood with heart rot is sawn for firewood and sold the population as fuel. Differentiated approach to the choice of the method for processing of wood with heart rot is the substantiation of the type of the obtained materials and products of various functional purposes depending on the size of heart rot. To ensure the competitiveness, products made of wood with heart rot must have higher performance characteristics in comparison with existing materials and products. Therefore, the methods of producing need to be connected with specific materials or products. Wood with heart rot of a diameter of up to 50 mm is the most appropriate to use for the production of rounded logs. For processing of wood with heart rot of diameter of 50–100 mm, the best method is a rotary cut of healthy wood for subsequent bonding of plywood products. From wood with heart rot of a diameter of 50 mm and more, square-edged sawn timber of small sizes (pallets) can be obtained.

**Keywords:** wood, heart rot, processing, plywood, rounded logs, defects.

Будучи в лидерах мирового запаса лесных ресурсов, РФ отстает от объемов использования древесины от других стран. В России на 1 м<sup>2</sup> построенного жилья приходится 0,05 м<sup>3</sup> древесных материалов, что в 10 раз ниже, чем в промышленно развитых странах [1]. На единицу жилой площади в РФ расходуется в 2–3 раза больше энергии, чем в странах Европы. На сегодняшний день Россия, являясь крупнейшей лесной державой мира, значительно отстает от других стран по основным экономическим и техническим показателям использования леса и по производству продукции из древесины. По уровню производства и потребления основных видов изделий из древесины на душу населения Россия уступает всем промышленно развитым и многим развивающимся странам, при этом многие виды изделий из древесины ввозятся из-за рубежа. В лесном секторе эта проблема стоит особенно остро. Россия является крупнейшим в мире экспортером необработанного сырья, а выход готовой продукции из 1 м<sup>3</sup> заготовленной древесины самый низкий среди лесопромышленных стран [1].

Для выполнения национальной программы «Доступное и комфортное жилье – гражданам России» необходимо увеличение объемов перерабатываемой древесины, а также новые строительные материалы, обладающие лучшими эксплуатационными свойствами по сравнению с существующими аналогичными материалами [2]. Древесина обладает определенными прочностными показателями, имеет низкую теплопроводность, способность обмениваться влагой с окружающей средой. Красивая текстура древесины создает уют. Достоинством древесины также является экологическая чистота и возобновляемость ресурсов.

Стратегия развития лесного комплекса РФ на период до 2020 г. нацеливает на развитие мощностей по глубокой механической, химической и энергетической переработке древесины. При этом одним из приоритетов является полномасштабное развитие деревянного домостроения и необходимых для этого материалов на основе древесины для решения жилищной проблемы.

Древесина твердолиственных и хвойных пород имеет хорошие прочностные и теплоизоляционные показатели и поэтому пользуется большим спросом. В результате сырьевые запасы этой древесины в европейской части страны постоянно сокращаются, а сама древесина становится дефицитной.

Дефицит твердолиственных и хвойных пород требует вовлечения в переработку неделовой древесины, которая по качественным показателям не соответствует требованиям стандартов на круглые лесоматериалы.

Эксплуатационные свойства древесины лиственных пород ниже, чем у древесины хвойных пород, из-за чего древесина лиственных пород и неделовая древесина хвойных используется преимущественно в плитном производстве. Направления использования древесины показаны на рис. 1 (древесина твердолиственных пород в данной схеме условно не показана).

Наличие пороков, место расположения, их размеры и количество определяют пригодность использования лесоматериалов к выпуску продукции требуемого назначения, полезный выход. Основными сортообразующими пороками древесины являются сучки, гнили, трещины, кривизна и др. Наиболее значимой из перечисленных пороков древесины является ядровая гниль. Гниль существенно снижает механические свойства

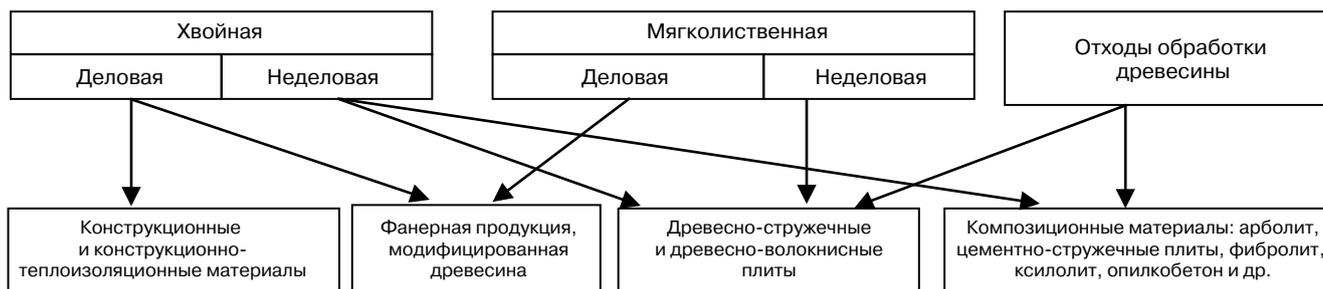


Рис. 1. Направления использования древесины

древесины и при сильном поражении делает древесину полностью непригодной для делового применения. Тогда как наличие сучков, трещин и кривизны практически не влияет на механические свойства полученных из них плитных или композиционных материалов.

Чаще всего гниль располагается в нижней и средней частях ствола. Древесина в этой части ствола характеризуется минимальным количеством сучков и поэтому наиболее пригодна для производства материалов и изделий. Однако наличие ядровой гнили сдерживает использование нижней и средней частей ствола деревьев с наибольшим диаметром.

Существующие способы переработки древесины с ядровой гнилью разделены по видам производств. В лесопильном производстве ядровую гниль чаще всего удаляют выпиливанием двухкантного бруса или сердцевинных досок в зависимости от размеров гнили.

В фанерном производстве для лущения шпона допускаются лесоматериалы с диаметром гнили 1/3 от диаметра чурака на одном торце. Для переработки древесины с ядровой гнилью с диаметром более 1/3 диаметра ствола можно использовать лущильные станки с внецентренным приводом. Чураки с диаметром гнили до 100 мм можно перерабатывать на лущильных станках с диаметром наружных шпинделей 110 мм для предотвращения прокручивания.

Для производства плитных материалов суммарное содержание гнили в щепе не должно превышать 5%. Допускается использование отдельных лесоматериалов с диаметром гнили до 0,5 диаметра ствола. Но чаще всего древесина с ядровой гнилью распиливается на дрова и реализуется населению как топливо. Наличие ядровой гнили в лесоматериалах является определяющим фактором для дальнейшего использования древесины, целесообразность переработки древесины зависит от размеров ядровой гнили. Весьма очевидна необходимость дифференцированного подхода к переработке древесины с ядровой гнилью в зависимости от размеров ядровой гнили. Актуальность переработки древесины с ядровой гнилью будет постоянно с каждым годом возрастать. В рыночных условиях лесозаготовители вынуждены самостоятельно решать вопросы по комплексному и рациональному использованию древесных ресурсов для получения максимального полезного выхода продукции.

Дифференцированный подход по выбору способов переработки древесины в соответствии с диаметром гнили:

- до 50 мм – удаление сверлением из лесоматериалов ядровой гнили;
- от 50 до 100 мм – лущение здоровой периферийной древесины;
- свыше 100 мм – выпиливание из лесоматериалов здоровой древесины.

Для обеспечения конкурентоспособности продукция, изготовленная из древесины с ядровой гнилью, должна обладать более высокими эксплуатационными показателями по сравнению с существующими материалами и изделиями. Поэтому способы получения долж-

ны быть тесно связаны с конкретными материалами или изделиями.

Лесоматериалы с ядровой гнилью диаметром до 50 мм наиболее целесообразно использовать для производства оцилиндрованных бревен, где полезный выход составляет около 80%. Небольшой диаметр полученного при сверлении отверстия не приведет к существенному снижению несущей способности бревен, а наоборот, будет способствовать улучшению процесса сушки бревен, предотвращая появление поверхностных трещин в бревнах [3, 4].

Чтобы избежать гниения, отверстие может быть обработано антисептиками. В зимнее время года для исключения промерзания стен из оцилиндрованных бревен отверстия должны быть закрыты заглушками.

Для переработки древесины с ядровой гнилью диаметром 50–100 мм наилучшим способом будет лущение здоровой части древесины для последующего склеивания из него фанерной продукции, причем диаметр кулачков в лущильных станках должен превосходить диаметр гнили для предотвращения прокручивания чураков в шпинделях. Безопилочное срезание наиболее качественной периферийной части чурака обеспечивает наибольший полезный выход. Из древесины с диаметром гнили 50–100 мм наиболее целесообразно изготавливать новые виды фанерной продукции: рельефную, филленчатую и композиционную профильную фанеру с улучшенным внешним видом; фанерную плиту с низкой теплопроводностью [5–7].

Вышеизложенные способы переработки древесины с ядровой гнилью диаметром до 50 и 50–100 мм предполагают использование специализированного оборудования, которое имеется не на всех предприятиях. Универсальным способом переработки древесины с ядровой гнилью диаметром как более, так и менее 100 мм является изготовление паллет – брусков для поддонов длиной 900–1200 мм, шириной 90–143 мм и толщиной 20–22 мм [8].

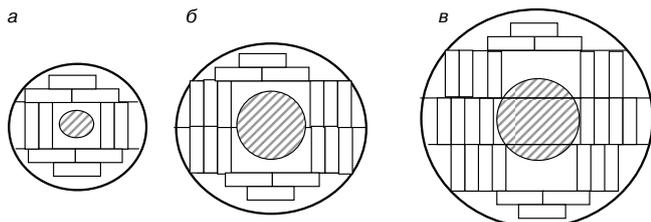
Схемы получения паллет из древесины с ядровой гнилью на рис. 2.

Максимальный выход заготовок из лесоматериала диаметром  $D$ , см, будет обеспечен в том случае, если соблюдается условие:

$$D = B / (0,6-0,8), \quad (1)$$

где  $B$  – суммарная толщина выпиливаемых брусков, см. Для выполнения условия (1) для лесоматериалов диаметром до 24 мм с диаметром ядровой гнили менее 100 мм (группа а) рекомендуется первая схема раскроя, показанная на рис. 2, а. Для лесоматериалов диаметром 240–320 мм (группа б) и диаметром ядровой гнили более 100 мм рекомендуется вторая схема раскроя с выпиливанием двух двухкантных брусков толщиной 100 мм (рис. 2, б). Для лесоматериалов диаметром свыше 340 мм (группа в) и диаметром ядровой гнили свыше 100 мм рекомендуется третья схема раскроя с выпиливанием трех брусков толщиной 100 мм (рис. 2, в).

У деревьев, пораженных ядровой гнилью, долго не обнаруживаются признаки поражения, крона сохраняет



**Рис. 2.** Схемы получения паллет из древесины с ядровой гнилью: а – диаметр бревна до 240 мм при диаметре гнили до 100 мм; б – диаметр бревна 240–320 мм при диаметре гнили свыше 100 мм; в – диаметр бревна свыше 340 мм при диаметре гнили более 100 мм

зеленую хвою и выглядит здоровой [9, 10]. Поэтому выявить и удалить ядровую гниль можно только при переработке древесины на обрезные пиломатериалы.

Для переработки лесоматериалов с ядровой гнилью в обрезные пиломатериалы разработано устройство, схема которого показана на рис. 2.

Устройство содержит два обрезных станка для последовательной обрезки каждой кромок, механизма подачи и вертикальные направляющие для перемещения пиломатериалов параллельно обрезаемым кромок. Обрезные станки выполнены двухпильными с возможностью регулирования расстояния между пилами и вертикальными направляющими (рис. 3). Два обрезных двухпильных станка последовательно выпиливают здоровую часть древесины дисковыми пилами с каждого края.

Каждый из станков содержит электродвигатель 1 с дисковой пилой 2 для обрезки обзоной кромки и электродвигатель 3 с дисковой пилой 4 для выпиливания здоровой древесины. Электродвигатели 1 и 3 установлены на направляющих 5, которые обеспечивают возможность перемещения электродвигателей 1 и 3 в горизонтальной плоскости. Устройства 6, установленные на станине 7, осуществляют перемещение электродвигателей 1 и 3 при помощи винтовой подачи 8. Перемещение обрезаемых пиломатериалов производится по горизонтальным направляющим 9. Вдоль боковых направляющих 10 осуществляют перемещение обрезаемого пиломатериала, который в свою очередь содержит обзоные кромки 11 и 15, полосы здоровой древесины 12 и 14, ядровую гниль 13.

Второй обрезной двухпильный станок аналогичен по конструкции первому станку и является его зеркальным отображением (боковые направляющие 10 установлены с противоположной стороны от горизонтальных направляющих 9).

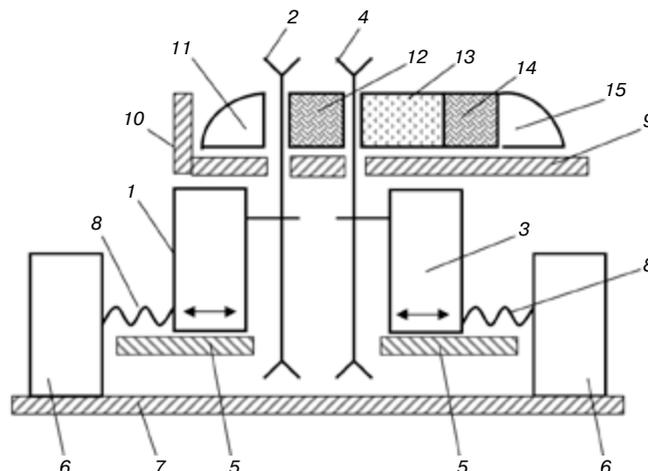
Перед обработкой в зависимости от размеров обзоной кромки, ширины полосы здоровой древесины и ядровой гнили пилы 2 и 4 устанавливаются таким образом, чтобы полученная при обработке полоса здоровой древесины имела максимальную ширину.

После настройки на требуемую ширину включают механизм и производят обрезку пилами 2 и 4, соответственно, обзоной кромки 11 и выпиливание полосы здоровой древесины. Оставшуюся часть древесины передают для обработки на второй станок.

На втором обрезном станке обработку древесины производят аналогично. Данное устройство обеспечи-

#### Список литературы

1. Лукаш А.А., Лукутцова Н.П. Новые строительные материалы и изделия из древесины. М.: АСВ, 2015. 288 с.
2. Лукаш А.А., Гришина Е.С. Дома из оцилиндрованных бревен: перспективы производства, недостатки и пути их устранения // *Строительные материалы*. 2013. № 4. С. 109–110.



**Рис. 3.** Схема выпиливания здоровой части древесины на обрезном станке: 1 и 3 – электродвигатели; 2 – дисковая пила для выпиливания обзоной кромки; 4 – дисковая пила для выпиливания здоровой древесины; 5 – направляющие; 6 – устройства для смещения электродвигателей; 7 – станина; 8 – винтовая подача; 9 – горизонтальные направляющие; 10 – боковые направляющие; 11 и 15 – обзоные кромки обрезаемого пиломатериала; 12 и 14 – полосы здоровой древесины; 13 – ядровая гниль

вает возможность получения обрезных пиломатериалов с максимальным объемным выходом.

На разработанном устройстве можно получать обрезные пиломатериалы из необрезных, содержащих ядровую гниль. Устройство является универсальным так как на нем можно также обрабатывать необрезные пиломатериалы без ядровой гнили. В этом случае дисковые пилы для выпиливания здоровой древесины обоих станков смещают в крайнее положение, а обработку пиломатериалов производят только пилами для выпиливания кромок.

Таким образом, установлено:

1. С уменьшением сырьевой базы в европейской части страны древесины хвойных и твердолиственных пород становится все более востребованной древесина с ядровой гнилью, запасы которой составляют здесь около 20% от всех запасов древесины.
2. Наличие ядровой гнили является определяющим фактором, который указывает на возможность дальнейшего использования древесины.
3. Для получения максимального полезного выхода предлагается дифференцировать способы переработки древесины в зависимости от диаметра гнили:
  - до 50 мм – высверливание из лесоматериалов ядровой гнили;
  - от 50 до 100 мм – лущение здоровой части древесины;
  - свыше 100 мм – выпиливание лесоматериалов здоровой древесины.
4. Наиболее целесообразно из древесины с ядровой гнилью производить следующие виды продукции в зависимости от диаметра гнили: при диаметре гнили до 50 мм – оцилиндрованные бревна; при диаметре гнили 50 – 100 мм – фанерную продукцию; при диаметре гнили свыше 100 мм – ячеистую стеновую панель.

#### References

1. Lukash A.A., Lukutsova N.P. *Novye stroitel'nye materialy i izdeliya iz drevesiny* [New building materials and wood products: monograph]. Moscow: ASV. 2015. 288 p.
2. Lukash A.A., Grishina E.S. Houses from round logs: production prospects, shortcomings and ways of their elimination. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 4, pp. 109–110. (In Russian).

3. Лукаш А.А. Исследование деформаций в слоистой древесине при ее сжатии разнотолщинной пресс-формой // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2014. № 3. С. 94–105.
4. Лукаш А.А., Лукутцова Н.П. Методика расчета теплопроводности ограждающей конструкции переменного сечения из оцилиндрованных бревен // *Жилищное строительство*. 2015. № 2. С. 34–37.
5. Лукаш А.А. Концепции создания новых строительных материалов из древесины // *Materials of the X International scientific and practical conference, «Scientific horizons»*. 2014. Vol. 11, p. 96.
6. Лукаш А.А., Глотов Г.В., Глотова Т.И. Обеспечение стабильности размеров и форм фанеры при ее эксплуатации // *Строительные материалы*. 2013. № 10. С. 42–43.
7. Серпик И.Н., Алексейцев А.В., Лукаш А.А. Методика анализа деформаций формообразования рельефной фанеры // *Строительные материалы*. 2012. № 12. С. 31–33.
8. Ключев В.С. Факторы дестабилизации состояния ельников и повышение их устойчивости лесохозяйственными мероприятиями на примере Брянской области. Дисс... канд. с.-х. наук. Брянск. 2013. 177 с.
9. Шелухо В.П. Состояние спелых и переспелых ельников в районах техногенеза // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2011. № 2. С. 23–29.
10. Лукаш А.А. Совершенствование технологического процесса изготовления паллет на ООО «Климоволеспром» // *Актуальные проблемы лесного комплекса: Сборник научных трудов по итогам VIII международной научно-технической конференции «Лес-2008»*. Брянск, 2009. С. 245–248.
3. Lukash A.A. The study of deformations in laminated wood with its different thicknesses compression mold. *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal*. 2014. No. 3. pp. 94–105. (In Russian).
4. Lukash A.A., Lukutsova N.P. The method of calculation of the thermal conductivity of enclosing structures of variable cross section round logs. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing construction]. 2015. No. 2, pp. 34–37. (In Russian).
5. Lukash A.A. The concept of creation of new building materials of wood. *Materials of the X International scientific and practical conference «Scientific horizons»*. 2014. Vol. 11, p. 96.
6. Lukash A.A., Glotov G.V., Glotova T.I. Ensuring the stability of sizes and forms of relief plywood in the course of its operation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2013. No. 10, pp. 42–43. (In Russian).
7. Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Lukash A.A. Methods of analysis of deformations during the fabrication of relief plywood. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 12, pp. 31–33. (In Russian).
8. Klyuev V.S. The factors of destabilization of the state of spruce forests and improving their sustainable forest management activities on an example of Bryansk area. Cand. Diss. (Agricultural). Bryansk. 2013. 177 p.
9. Shelukho V.P. Status of ripe and overripe spruce in areas technogenesis. *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal*. 2011. No. 2, pp. 23–29.
10. Lukash A.A., Rudnitsky V.N., Semenov A.N. Improvement of technological process of manufacture of pellets at ООО «Klimovolesprom». *Actual problems of forestry complex: Collection of scientific papers on the results of the VIII International Scientific Conference «Forest 2008»*. Bryansk. 2009, pp. 245–248.

## Требования к статьям, направляемым для публикации в журнал «Строительные материалы»®

### Уважаемые авторы!

Приступая к оформлению статьи для журнала «Строительные материалы»® внимательно ознакомьтесь с правилами и рекомендациями, размещенными на сайте издательства:

- Статьи серии «Начинающему автору» – [www.rifsm.ru/files/avtoru.pdf](http://www.rifsm.ru/files/avtoru.pdf)
- Как подготовить к публикации научно-техническую статью – [www.rifsm.ru/page/7](http://www.rifsm.ru/page/7)

Статьи, направляемые для опубликования, должны оформляться в соответствии с техническими требованиями издания:

- текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word и сохранен в формате \*.doc или \*.rtf;
- 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 ВСЕМИ авторами;
- рефератом объемом не менее 100 слов 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 (заполненная информационная карта).

### 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.

*Следуйте рекомендациям, и возжеланная публикация не заставит себя долго ждать!*

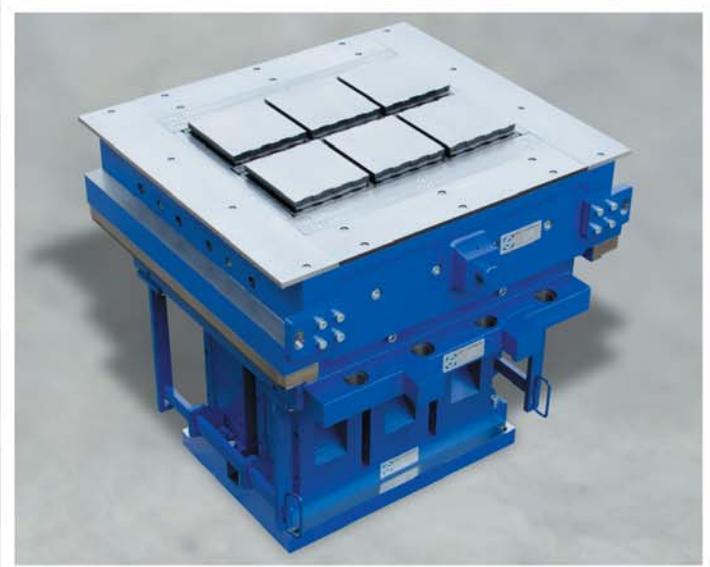


# PRÄZI

PRÄZI GROUP



## > ПРЭТСИ – ВАШ ПАРТНЁР В СФЕРЕ БИЗНЕСА ПО ПРОИЗВОДСТВУ СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА



> [www.praezi.de](http://www.praezi.de)

PRÄZI-FLACHSTAHL AG

Günther-Claas-Straße 1

48351 Everswinkel, Germany

Tel. +49 (0) 25 82 76 - 235

Fax +49 (0) 25 82 76 - 158

E-mail [kalksandstein@praezi.de](mailto:kalksandstein@praezi.de)

> НАДЕЖНЫЙ ПАРТНЕР –  
ГАРАНТИЯ ВАШЕГО УСПЕХА





## Экономичное изготовление керамических изделий



**До 60% меньше потребление энергии\***

Для экструдированных и  
прессованных изделий,  
таких как черепица, кирпич и др.

\*Точные значения зависят от сырьевых материалов  
и локальных условий

- Значительное сокращение себестоимости
- Значительное сокращение выбросов CO<sub>2</sub>
- Грануляция производится без добавок

ООО «АЙРИХ МАШИНЕНТЕХНИК»

129343 Россия, Москва, ул. Уржумская, 4, стр. 2

Тел.: +7-495-7716880 Факс: +7-495-7716879

e-mail: [info@eirich.ru](mailto:info@eirich.ru) [www.eirich.ru](http://www.eirich.ru)

**Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG**

Postfach 1160, 74732 Hardheim, Germany

Phone: +49 (0) 6283 51-0, Fax: +49 (0) 6283 51-325

E-mail: [eirich@eirich.de](mailto:eirich@eirich.de), Internet: [www.eirich.com](http://www.eirich.com)

