

УДК 691.5

Н.И. КОЖУХОВА, канд. техн. наук (kozuhovanata@yandex.ru), Е.В. ВОЙТОВИЧ, канд. техн. наук, А.В. ЧЕРЕВАТОВА, д-р техн. наук, И.В. ЖЕРНОВСКИЙ, канд. геол.-минер. наук, Д.А. АЛЕХИН, инженер Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

## Термостойкие ячеистые материалы на основе композиционных гипсокремнеземных вяжущих

В рамках исследования были изучены характеристики пенобетонных материалов на основе гипсового и наноструктурированного вяжущих, а также разработаны составы пенобетона на основе композиционного гипсокремнеземного вяжущего, обеспечивающие более низкие показатели теплопроводности композитов при более высоких прочностных характеристиках. Изучены особенности микроструктуры, а также фазовые трансформации, происходящие при высокотемпературной обработке разработанного композиционного вяжущего. Выявлено, что повышение термостойкости гипсокремнеземной ячеистой системы вызвано формированием субкристаллических призматических образований гидросульфосиликатных фаз, предположительно гидроксиллестадита под действием высокотемпературной обработки. Предложен способ получения пенобетонной массы, обеспечивающий равномерное распределение пеномассы в вяжущей системе, а также однородность поровой структуры затвердевшего ячеистого композита.

**Ключевые слова:** композиционное гипсокремнеземное вяжущее, пенобетон, способ получения, теплофизические характеристики/

N.I. KOZHUKHOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (kozuhovanata@yandex.ru), E.V. VOYTOVICH, Candidate of Sciences (Engineering), A.V. CHEREVATOVA, Doctor of Sciences (Engineering), I.V. ZHERNOVSKY, Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), D.A. ALEKHIN, Engineer Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

### Heat-Resistant Cellular Materials on the Basis of Composite Gypsum-Silica Binders

In the course of the research, characteristics of foam concrete materials on the basis of gypsum and nano-structured binders have been studied; compositions of the foam concrete on the basis of a composite gypsum-silica binder ensuring lower values of heat conductivity of composites at higher strength characteristics have been developed. Features of the micro-structure as well as phase transformations taking place during the high-temperature treatment of the developed composite binder have been studied. It is revealed that the improvement of heat-resistance of the gypsum-silica cellular system is due to the formation of sub-crystal, prismatic generations of hydrosulphosilicate phases, hydroxyllestadite supposedly, under the impact of high temperature treatment. A method for producing the foam concrete mass which ensures the uniform distribution of the foam mass in the binding system as well as homogeneity of the porous structure of hardened cellular composite is proposed.

**Keywords:** composite gypsum-silica binder, foam concrete, production method, thermophysical characteristic.

В связи с современной тенденцией, направленной на внедрение высокоэффективных экологически чистых технологий производства строительных материалов, интенсифицированной национальной программой «Жилище», которая предполагает стремительное наращивание темпов строительства, следует обратить внимание на ресурсосбережение, эффективные материалы и технологии, а также на эколого-экономическую переориентацию производителей продукции. Кроме того, обнародование Закона РФ «Об энергосбережении» заставило Госстрой пересмотреть положение ГОСТов и СНиПов в отношении теплозащиты зданий и сооружений. Поэтому закономерно, что производство современных строительных материалов с высокими теплофизическими характеристиками является одной из главных задач, стоящих перед строительной отраслью.

В то же время в последние годы в мировой практике неуклонно растет интерес к бесклнкерным ячеистым композитам строительного назначения, эффективно сочетающим в себе экологические, технико-экономические и теплофизические характеристики. В связи с этим с учетом отмеченных предпочтений современного строительного рынка наиболее ярким примером могут служить изделия и конструкции на

основе пеногипса и его разновидностей [1–3]. Ячеистые изделия на основе гипсового вяжущего обладают такими важными преимуществами, как территориальная доступность сырьевой базы, простота и дешевизна технологического процесса получения гипсовых изделий, экологическая чистота и высокие теплозащитные свойства.

Альтернативой пеногипсу могут служить пенобетонные изделия, получаемые на основе новых видов композиционного гипсового вяжущего, одним из которых является композиционное гипсовое вяжущее с применением наноструктурированного компонента (КГНВ) [4].

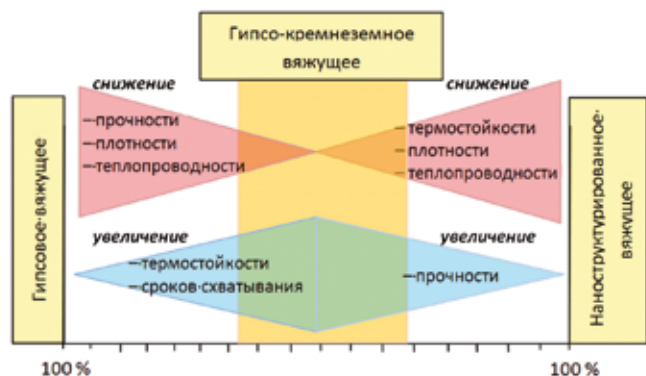
Наноструктурированное вяжущее (НВ) представляет собой неорганическую полидисперсную и полимеральную вяжущую систему, имеющую преимущественно силикатный или алюмосиликатный состав и обладает высокой концентрацией активной твердой фазы, содержащей нанодисперсный компонент в количестве 3–10%. [5]

Пенобетон на основе НВ, несмотря на ограниченность его использования в силу малой распространенности и изученности, наравне с гипсовыми ячеистыми аналогами является довольно эффективным экологичным теплоизоляционным материалом (табл. 1) [6–9].

Таблица 1

Характеристики пенобетона на основе существующих бесцементных вяжущих

Пенобетон на основе	Эксплуатационные характеристики			
	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при сжатии после обжига, МПа
Гипса	0,12	400	0,8	0,12
НВ	0,09	400	1,1	0,09



**Рис. 1.** Схема изменения эксплуатационных характеристик пенобетона при использовании комплекса вяжущих (гипсового и наноструктурированного)

Из приведенных данных (табл. 1) можно отметить ряд преимуществ пенобетонных изделий на основе гипса и НВ, но и ряд недостатков.

В первом случае при достаточной прочности основным недостатком пенобетонных изделий на основе гипса является довольно высокий коэффициент теплопроводности, а также полное разрушение под воздействием высокой температуры, т. е. отсутствие термостойкости.

Для пенобетонных композитов на основе НВ наблюдается обратный эффект: при незначительной прочности характерны низкие значения плотности и теплопроводности, а также высокая устойчивость в условиях высокотемпературного воздействия. Более того, после высокотемпературной обработки пенобетона на основе НВ наблюдается увеличение прочностных показателей в сравнении с аналогами, не подвергающимися действию высокой температуры.

Постоянное ужесточение требований по теплозащите зданий приводит к необходимости снижения показателей теплопроводности с сохранением достаточно высоких прочностных показателей при низких значениях плотности легких композитов. В связи с этим предлагаемые на сегодняшний день теплоизоляционные материалы на бесклнкерной основе неуклонно теряют свою актуальность.

В работе проведены исследования с целью получения оптимальных составов композиционного гипсо-кремнеземного вяжущего для производства пенобетона с улучшенными прочностными и теплофизическими характеристиками (рис. 1).

Для получения гипсокремнеземного пенобетона использовалось гипсовое вяжущее марки Г-5АII производства «Самарский гипсовый комбинат»; кремнеземное НВ на основе песка Корочанского месторождения (Белгородская обл.). При получении пенобетона использовался синтетический пенообразователь Esaron.

Основой обеспечения улучшенных эксплуатационных свойств композита является подбор оптимального соотношения сырьевых компонентов, входящих в его состав. Для этого было приготовлено 11 составов гипсокремнеземного пенобетона с различным соотношением вяжущих составляющих: гипса и НВ в диапазоне содержания гипсового вяжущего 100–0 % с шагом в 10 %. При приготовлении вяжущего исходные компоненты брались по сухому веществу, при этом вяжущее НВ имело влажность  $W=14-20\%$ . Ее нужно учитывать при расчете В/Г отношения. Таким образом, необходимое количество воды для получения композиционного вяжущего нормальной консистенции (расплыв конуса  $180\pm 5$  мм) колебалось в пределах 30–70 % по сухому веществу всех компонентов.

В состав пены входили пенообразователь и вода в соотношении 92:8.

С учетом специфики основных компонентов композиционного гипсокремнеземного вяжущего был предложен способ приготовления гипсокремнеземного пенобетона, заключающийся в следующем: предварительное смешивание наноструктурированного кремнеземного компонента (НКК) с водой в течение 30–60 с до получения однородной водной суспензии с последующим введением полугидрата гипса и перемешиванием в течение 20 с.

Введение НВ в воду и предварительное получение водной суспензии позволяют при дальнейшем введении гипсового вяжущего получить однородную сырьевую смесь с равномерно распределенным НВ по структуре в период заданного времени и замедлить сроки схватывания гипсового композита.

**Таблица 2**

**Технико-эксплуатационные характеристики гипсокремнеземного пенобетона в зависимости от состава**

Состав	Содержание компонентов, %		Эксплуатационные параметры			
	НВ	гипс	Прочность до обжига $R_{сж}$ , МПа	Прочность после обжига* $R_{сж}$ , МПа	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
1	0	100	0,08	–	520	0,16
2	10	90	0,89	0,11	450	0,095
3	20	80	0,95	0,38	400	0,079
4	30	70	1,06	0,51	400	0,064
5	40	60	1,28	1,14	400	0,055
6	50	50	1,39	1,49	400	0,049
7	60	40	1,31	1,53	400	0,049
8	70	30	1,27	1,56	400	0,048
9	80	20	1,18	1,46	400	0,057
10	90	10	1,12	1,45	400	0,063
11	100	0	1,1	1,43	400	0,08

\*Обжиг осуществлялся при температуре 1000°C



Рис. 2. Схема приготовления гипсокремнеземного пенобетона

Параллельно подготавливается пена. Пена получается введением пенообразователя в воду и интенсивным вертикальным возвратно-поступательным движением смесителя в течение 2–3 мин.

Затем пена быстро вводится в вяжущую систему и перемешивается до достижения равномерной структуры. Перемешивание происходит в смесителе с большими лопастями на малых оборотах (рис. 2).

Немаловажным фактором при приготовлении пенобетонной массы является длительность перемешивания готовой системы, так как, с одной стороны, необходимо равномерное распределение всех компонентов в объеме, а с другой – избежать усадки пены в системе.

Экспериментальные составы гипсокремнеземного пенобетона, полученные по предложенной технологии, были залиты в формы-кубы 7×7×7 см и выдержаны в естественных условиях в течение 7 сут. Затем затвердевшие образцы были расформованы и испытаны (табл. 2).

Согласно полученным результатам (табл. 3) наиболее эффективны составы с соотношением вяжущих компонентов НВ: гипсовое вяжущее 60:40 и 70:30 (составы 6 и 7 соответственно), которые обеспечивают высокие показатели по прочности при сжатии до и после температурной обработки при минимальных значениях коэффициента теплопроводности.

Состав пеногипса на основе гипсового вяжущего продемонстрировал наиболее высокие значения теплопроводности среди экспериментальных составов, а также значительное растрескивание образцов после обжига, что объясняет отсутствие у них прочности при сжатии. В то же время состав 11 (пенобетон на НВ) демонстрирует минимальные прочностные показатели образцов, а также плохую расформовываемость после твердения (рис. 3).

Ранними исследованиями было установлено, что минеральный состав композиционного вяжущего 80% гипса, 20% кварцевое НВ представлен при комнатной температуре (мас. %): гипсом (66), ангидритом III (5), доломитом (7), кварцем (20) и гидроксидом элестадитом (2). При температуре 1000°C минеральный состав трансформируется в композицию: β-кварц (19), известь (26), периклаз (2), нерастворимый (ромбический) ангид-



Рис. 3. Образцы после высокотемпературной обработки (1000°C): 1 – 100 % гипсовое вяжущее; 2 – гипсовое вяжущее:НВ 70:30; 3 – гипсовое вяжущее:НВ 50:50; 4 – гипсовое вяжущее:НВ 30–70; 5 – 100 % НВ

рит (7), элестадит (6), α<sub>L</sub>-Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (30) и ольдгамит – CaS (10) [1]. Отличительной особенностью этой композиции является то, что отношение суммы молярных объемов всех кристаллических фаз при комнатной температуре к таковой при 1000°C близко к 1. Этим обеспечивается отсутствие деструктивного формоизменения при термическом воздействии.

Изучение термической трансформации образцов затвердевшего НВ не проводилось. Тем не менее из результатов, приведенных в табл. 3, следует, что основной вклад в формирование прочностных свойств композиционного гипсокремнеземного вяжущего создается компонентом НВ.

Поэтому из-за предположения возникновения при термической обработке (при T=1000°C) высокотемпературной модификации кварца (β-кварц<sup>1</sup>), остывание образцов проводилось с различной скоростью. Самая медленная скорость остывания непосредственно в высокотемпературной камере, средняя скорость – на воздухе и максимальная – остывание в воде.

Для выяснения причин упрочнения образцов при термической обработке была исследована трансформация минерального состава методом полнопрофильного количественного РФА.

Дифракционные спектры образцов были получены на рентгеновской станции WorkStation ARL 9900 с использованием излучения Со-анода в Центре высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова. Расчетная часть работы проводилась при помощи программы DDM v.1.95d в варианте ритвельдовского алгоритма [10]. В качестве структурных моделей использовались данные базы структурных данных ICSD.

Все рентгенограммы образцов НВ с различной скоростью остывания практически неотличимы друг от друга.

Следует отметить, что расчеты на модельные составы α-кварц + корунд (наполнители мелкого размера) и α-кварц + β-кварц + корунд дали удовлетворительную сходимость, однако величина взвешенного R<sub>wp</sub>-фактора<sup>2</sup> всегда была ниже при расчете на вторую модель, что

Таблица 3

Результаты полнопрофильного количественного РФА термообработанного НВ (мас. %)

	1	2	3	1	2	3
	α-кварц + корунд			α-кварц + β-кварц + корунд		
α-Кварц	96,17±2,36	96,01±2,47	96,04±1,49	76,32±0,81	81,72±2,71	79,64±1,94
β-Кварц				19,75±1,74	14,16±2,22	16,37±1,99
Корунд	3,83±0,07	3,99±0,07	3,96±0,08	3,94±0,07	4,13±0,07	3,99±0,08
R <sub>wp</sub>	15,571	13,799	13,860	13,929	12,047	12,558

Примечание. 1 – остывание в камере, 2 – на воздухе, 3 – в воде.

<sup>1</sup> Авторы используют минералогическую номенклатуру, согласно которой низкотемпературные полиморфные модификации обозначаются первыми буквами греческого алфавита.

<sup>2</sup>  $R_{wp} = 100 \cdot \sqrt{\sum w_i (Y_i - Y_{bi})^2 / (\sum w_i (Y_i - Y_{bi})^2)}$ , где  $Y_i$  – экспериментальная интенсивность дифракционного спектра в точке  $i$ ,  $Y_{ci}$  и  $Y_{bi}$  – расчетная интенсивность и интенсивность фона в этой точке.

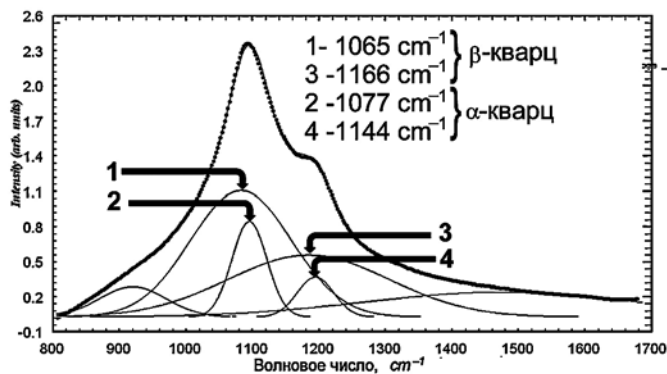


Рис. 4. Фиттинг профиля ИК-спектра

свидетельствует о лучшей сходимости расчетного дифракционного спектра к экспериментальному (табл. 3).

Тем не менее для окончательного решения вопроса о возникновении в материале НВ высокотемпературной β-модификации кварца, был использован метод ИК-спектроскопии. ИК-спектры поглощения были получены на ИК-Фурье-спектрометре Vertex-70 (Bruker). Никаких отличий в зависимости от скорости охлаждения на ИК-спектрах не обнаружено. Для идентификации полос поглощения, характерных для α- и β-кварца, использован прием фиттинга (англ. fitting — монтаж) профиля ИК-поглощения в интервале 800–1400 см<sup>-1</sup>. Частотные значения полос поглощения (см<sup>-1</sup>) в этом интервале рассчитаны на основании демо-файлов программы VIBRATZ v.2.3 (Shape Software). Фиттинг профиля проводился с использованием программы Fityk v.0.9.3. При этом уточнялись только высоты и уширения расчетных профилей, аппроксимированных гауссианом. Значения волновых чисел полос поглощения α- и β-кварца были зафиксированы. Результат обработки ИК-спектра охлажденного в воде термообработанного образца НВ представлен на рис. 4.

Профили высокотемпературного β-кварца характеризуются существенным в отличие от профилей низкотемпературного α-кварца уширением, что является следствием наномасштабных размеров кристаллитов β-кварца [11].

Этот факт согласуется с термодинамическими оценками размерной устойчивости высокотемпературного β-кварца при низкой температуре [12]. Согласно этим оценкам β-кварц может существовать ниже точки β-α-инверсии при размерах кристаллитов, не превышающих некоторого критического значения, равного 25–30 нм.

Таким образом, термическое воздействие на кварцевую компоненту композиционного гипсокремнеземного вяжущего инициирует появление в первой фазово-размерной гетерогенности, заключающейся в возникновении термически устойчивого парагенезиса α-кварц — β-кварц. При этом наноразмерные кристаллиты β-кварца в матрице α-кварца создают эффект нанодисперсного армирования, повышающего прочностные свойства НВ-компоненты вяжущего.

Анализ микроструктуры образцов показал, что в результате высокотемпературной обработки наблюдается деструкция гипсового камня за счет дегидратации и десульфатации системы и, как следствие, разрушение гидросульфатов кальция (рис. 5, з), характерных для гипсовой системы, твердеющей в естественных воздушных условиях (рис. 5, а). Процессы фазовой деструкции способствуют уплотнению и уменьшению объема структуры, что вызывает ярко выраженные усадочные деформации, подтверждаемые визуальной оценкой образцов пенобетона до и после высокотемпературной обработки (рис. 3).

На основании визуальной оценки микроструктуры гипсового камня до и после высокотемпературной об-

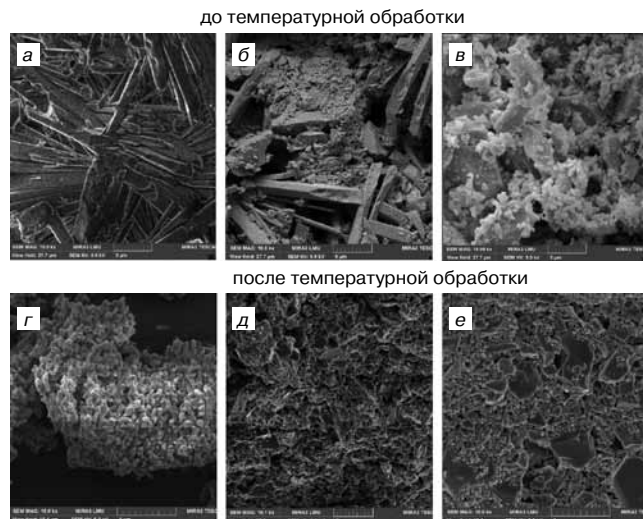


Рис. 5. Микроструктурные особенности пенобетонных систем до и после обработки при 1000 °С

работки (рис. 5, а, з), а также с учетом ранее проведенных исследований [1] фазовый состав гипсового камня, подверженного высокотемпературной обработке, представлен кристаллическими псевдоморфными образованиями извести по ангидриту.

В то же время для затвердевшей пеномассы на основе НВ характерна более рыхлая и менее упорядоченная структура без видимых признаков новообразований (рис. 5, в) в сравнении с гипсовой системой. Однако после высокотемпературной обработки при 1000 °С для системы на основе НВ наблюдается упорядочение и уплотнение структуры (рис. 5, е), что, вероятно, вызвано термальной перекристаллизацией низкотемпературной модификации кварца с формированием более низкодефектной структуры. Это, в свою очередь, способствует упрочнению системы (табл. 2).

Микроструктура композиционной гипсокремнеземной системы до высокотемпературного воздействия демонстрирует высокую пористость системы, слабую адгезию частиц кремнезема к кристаллам гидросульфатов кальция (рис. 5, б). Однако в структуре термически обработанного гипсокремнеземного образца в результате интенсификации процессов реструктурирования кристаллов гидросульфатов кальция наблюдается формирование субкристаллических призматических образований гидросульфосиликатных фаз, предположительно элестадита (рис. 5, д). При этом обеспечиваются значительно меньшие усадочные деформации в объеме твердеющей матрицы композита.

Таким образом, в ходе проведенных исследований было установлено, что получение пенобетонных материалов на основе разработанного композиционного гипсокремнеземного вяжущего позволяет улучшить теплофизические характеристики ячеистых композитов, получаемых с использованием бесцементных вяжущих. Применение гипсокремнеземного вяжущего придает получаемым композитам повышенные показатели термостойкости, предотвращаются их растрескивание и усадка при высокотемпературных воздействиях, что связано с трансформацией низкотемпературных фаз в субкристаллические призматические образования.

*Работа выполнена в рамках служебного задания по г/б теме № А-4/14 Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2012-2016 гг. (№ 2011-ПР-146. Мероприятие 2 «Модернизация научно-исследовательского процесса и инновационной деятельности») с использованием оборудования на базе Центра Высших Технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*



## Список литературы

1. Жерновский И.В., Череватова А.В., Войтович Е.В., Ксенофонтов А.Д. Жаростойкость композиционно-вязующего системы  $\text{CaO-SO}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  // *Строительные материалы*. 2014. № 7. С. 57–61.
2. И.В. Бессонов, Р.И. Шигапов, В.В. Бабков Теплоизоляционный пеногипс в малоэтажном строительстве // *Строительные материалы*. 2014. № 7. С. 9–13.
3. Петропавловская В.Б., Бурьянов А.Ф. Новиченкова Т.Б. Малоэнергоёмкие гипсовые материалы и изделия на основе отходов промышленности // *Строительные материалы*. 2006. № 7. С. 8–9.
4. 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.
5. Череватова А.В., Жерновский И.В., Строкова В.В. Минеральные наноструктурированные вяжущие. Природа, технология и перспективы применения. Saarbrücken: LAM LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2011. 170 с.
6. Урханова Л.А., Дашицыренов Д.Д., Заяханов М.Е. Эффективный пенобетон на основе эффузивных пород // *Строительные материалы*. 2007. № 4. С. 50–51.
7. Z. Bazelova, L. Pach, J. Lokaj The effect of surface active substance concentration on the properties of foamed and non-foamed gypsum // *Ceramics – Silikáty*. 2010. № 54. P. 379–385.
8. Павленко Н.В., Череватова А.В., Строкова В.В. Особенности получения рациональной поровой структуры пенобетона на основе наноструктурированного вяжущего // *Строительные материалы*. 2009. № 10. С. 33–36.
9. Строкова В.В., Череватова А.В., Павленко Н.В., Мирошников Е.В., Шаповалов Н. А. Оценка эффективности применения наноструктурированного вяжущего при получении легковесных ячеистых композитов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. № 4. С. 48–51.
10. Solovyov L.A. Full-profile refinement by derivative difference min-imization. // *Journal of Applied Crystallography*. 2004. № 37. P. 743–749.
11. Fernandez-Garcia M., Martynez-Arias A., Hanson J.C., Rodriguez J.A. Nanostructured Oxides in Chemistry: Characterization and Properties // *Chem. Rev.*, 2004. № 104. P. 4063–4104.
12. Дубровинский Л.С., Пилюян Г.О. Влияние размера кристаллитов на температуру полиморфного  $\alpha \leftrightarrow \beta$  перехода кварца // *Доклады АН СССР*. 1986. Т. 286. № 4. С. 958–961.

## References

1. Zhernovsky I.V., Cherevatova A.V., Voitovich E.V., Ksenofontov A.D. Heat Resistance of Composite Binder of  $\text{CaO-SO}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  System. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 7, pp. 57–61. (In Russian).
2. Bessonov I.V., Shigapov R.I., Babkov V.V. Heat-Insulating Foamed Gypsum in Low-Rise Construction. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 7, pp. 9–13. (In Russian).
3. Petropavlovskaya V.B., Buryanov A.F., Novinchenkova T.B. Low Power Intensive Gypsum Materials and Products Based on Industrial Waste. *Stroitel'nye materialy*. [Construction Materials]. 2006. No. 7, pp. 8–9. (In Russian).
4. Strokova V.V., Cherevatova A.V., Zhernovsky I.V., Voytovich E.V. Features of Phase Formation in a Composite Nanostructured Gypsum Binder. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 7, pp. 9–12. (In Russian).
5. Cherevatova A.V., Zhernovsky I.V., Strokova V.V. Mineral'nye nanostrukturirovannye vjazhushhie. Priroda, tehnologija i perspektivy primenenija [Mineral nanostructured binders. Nature, technology and prospective of application]. Saarbrücken: LAM LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2011. 170 pp.
6. Dashitsirenov D.D., Zayakhanov M.E., Urkhanova L.A. Effective foam concrete based on effusive rocks. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 4, pp. 50–51. (In Russian).
7. Z. Bazelova, L. Pach, J. Lokaj The effect of surface active substance concentration on the properties of foamed and non-foamed gypsum. *Ceramics – Silikáty*. 2010. No. 54, pp. 379–385.
8. Dashitsirenov D.D., Zayakhanov M.E., Urkhanova L.A. Effective foam concrete based on effusive rocks. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 4, pp. 50–51. (In Russian).
8. Pavlenko N.V., Cherevatova A.V., Strokova V.V. Features of rational pore structure formation in foam concrete on the base of nanostructured binder. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 10, pp. 33–36. (In Russian).
9. Strokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V., Miroshnikov E.V., Shapovalov N.A. Estimation of efficiency of nanostructured binder application when lightweight cellular composite production. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2011. No. 4, pp. 48–51. (In Russian).
10. Solovyov L.A. Full-profile refinement by derivative difference min-imization. *Journal of Applied Crystallography*. 2004. No. 37, pp. 743–749.
11. Fernandez-Garcia M., Martynez-Arias A., Hanson J.C., Rodriguez J.A. Nanostructured Oxides in Chemistry: Characterization and Properties. *Chem. Rev.* 2004. No. 104, pp. 4063–4104.
12. Dubrovinsky L.S., Piloyan G.O. Influence of crystallite size on temperature of polymorphous  $\alpha \leftrightarrow \beta$  transformation for quartz. *Docladyi Akademii nauk SSSR*. 1986. Vol. 286. No. 4, pp. 958–961. (In Russian).



Подписка на электронную версию журнала «Строительные материалы»®

<http://ejournal.rifsm.ru/>