

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.327.333

*КУДЯКОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
kudyakow@tsuab.ru*

*СТЕШЕНКО АЛЕКСЕЙ БОРИСОВИЧ, канд. техн. наук, ст. преподаватель,
steshenko.alexey@gmail.com*

*КОНУШЕВА ВИКТОРИЯ ВИКТОРОВНА, студентка,
konusheva2013@yandex.ru*

*СЫРКИН ОЛЕГ ОЛЕГОВИЧ, студент,
abakanblakkzee@gmail.com*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ УМЕНЬШЕНИЯ УСАДКИ НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА И ПОВЫШЕНИЯ КЛАССА ПО ПРОЧНОСТИ*

Приведены результаты исследований цементного пенобетона с повышенным уровнем и стабильностью качества. Оптимизированы технологические приемы приготовления пенобетонной смеси. При введении в пенобетонную смесь глиоксала кристаллического в количестве 0,01 % от массы цемента снижаются усадочные деформации пенобетона в 28-суточном возрасте на 50 %, коэффициенты вариации средней плотности – с 3,4 до 2,2 % и прочности при сжатии пенобетона – с 10,5 до 7,6 %. В пенобетонах с добавкой глиоксала кристаллического повышается класс пенобетона до В0.75 при сохранении марки по средней плотности D500.

Ключевые слова: теплоизоляционный пенобетон; глиоксаль кристаллический; средняя плотность; прочность на сжатие; усадочные деформации; класс бетона по прочности.

*ALEKSANDR I. KUDYAKOV, DSc, Professor,
kudyakow@tsuab.ru*

*ALEKSEI B. STESHENKO, PhD, Senior Lecturer,
steshenko.alexey@gmail.com*

*VIKTORIYA V. KONUSHEVA, Student,
konusheva2013@yandex.ru*

* Исследования проводились при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках гранта № 7530ГУ2/2015 от 11.09.2015.

*OLEG O. SYRKIN, Student,
abakanblakkzee@gmail.com
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

PRODUCTION METHODS OF REDUCING NON-AUTOCLAVE FOAMED CONCRETE SHRINKAGE AND INCREASING ITS QUALITY CLASS

The paper presents research results on foamed concrete with the higher quality level and stability. The production methods of foamed concrete preparation are optimized. It is shown that the introduction of 0,01 wt.% crystalline glyoxal in 28-day age foamed concrete provides 50 % decrease of shrinkage deformation. Also, the average density variation factor decreases from 3,4 to 2,2 %, and the compressive strength decreases from 10,5 to 7,6 %. In the foamed concretes with crystalline glyoxal addition the quality class improves to B0.75 with reserving its D500 average density.

Keywords: heat insulating foamed concrete; crystalline glyoxal; average density; compressive strength; shrinkage deformation; strength quality of concrete.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 323 от 15 апреля 2014 г. предполагается увеличение объемов строительства малоэтажного жилья экономического класса. Одним из эффективных стеновых материалов при малоэтажном жилищном строительстве является теплоизоляционный пенобетон.

При проектировании стеновых конструкций из теплоизоляционного пенобетона большое внимание уделяется его качеству, а именно теплопроводности и прочности на сжатие, оцениваемых классом бетона. На класс бетона и теплозащитные характеристики стеновых конструкций влияют уровень и стабильность качества, а также усадочные деформации пенобетона.

По причине усадочных деформаций в пенобетоне формируются внутренние напряжения, что приводит к образованию трещин, нестабильности геометрических размеров, снижению прочности и теплосопrotivления стеновых конструкций зданий. Согласно ГОСТ 25485–89 усадка теплоизоляционных пенобетонов не нормируется. Однако, как показывает практика, усадка теплоизоляционных пенобетонов может достигать 5 мм/м. Столь высокие значения усадочных деформаций не позволяют обеспечить требуемые параметры для проектирования малоэтажных домов и сооружений из теплоизоляционных пенобетонных блоков, а именно класс по прочности на сжатие B0.5-B2 при коэффициенте вариации 13,5 % и коэффициенте теплопроводности 0,12–0,14 Вт/(м·°С) в сухом состоянии.

Целью настоящей работы является разработка научно обоснованных составов и технологических приемов изготовления пенобетона неавтоклавного твердения с пониженной усадкой, высоким уровнем и стабильностью параметров качества.

Проблемой повышения качества поризованных бетонов занимаются многие научные коллективы: Л.Б. Моргун, В.Н. Моргун (г. Ростов-на-Дону) [1], В.И. Удачкин [2], А.П. Меркин (г. Москва) [3], Ю.В. Пухаренко [4], В.А. Пинскер (г. Санкт-Петербург) [5], Л.Д. Шахова [6], А.С. Коломацкий (г. Белгород) [7], А.И. Кудяков (г. Томск) [8, 9].

Из результатов исследований [8, 10–12] и обобщений опыта производства пенобетонов, строительства и эксплуатации из него зданий следует, что при правильном проектировании состава и соблюдении технологии изготовления пенобетона можно получить качественный стеновой материал многоцелевого назначения, удовлетворяющий техническим требованиям, экологической безопасности и обеспечивающий комфортность проживания, низкую стоимость жилья [5].

Изделия из пенобетона применяются в жилищном, гражданском и промышленном строительстве независимо от климатических условий и сейсмичности территории застройки. При малоэтажном строительстве теплоизоляционный пенобетон чаще всего используется в виде стеновых блоков. По результатам анализа технологических процессов изготовления и эксплуатации стеновых материалов из пенобетона в зданиях по критериям теплопроводность, прочность и морозостойкость наибольшей востребованностью обладают пенобетоны со средней плотностью 400–600 кг/м³ D400–D600 [3].

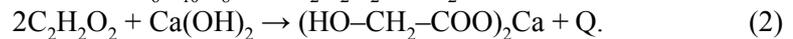
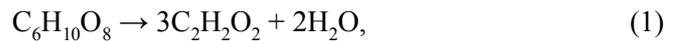
При всех положительных качествах пенобетон обладает рядом недостатков: усадочные деформации [1, 13], низкая трещиностойкость, неоднородность структуры и распределения пор в объеме за счет их слияния в процессе начального структурообразования, что приводит к значительным колебаниям значений средней плотности, прочности при сжатии и снижению эксплуатационных характеристик пенобетона [9]. Показатель изменчивости по параметрам средней плотности и прочности при сжатии достигает 5–15 % и 15–25 % соответственно.

Процесс управление уровня и стабильности качества затрудняется в связи с отсутствием научных результатов, показывающих взаимосвязь усадки пенобетона с однородностью показателей прочности на сжатие, коэффициента теплопроводности и другими эксплуатационными характеристиками. Следует установить закономерности и связи в системе «состав – технология – структура – свойства» для обеспечения требуемого класса пенобетона. Повышение однородности параметров качества способствует формированию конкурентных преимуществ стеновых материалов в ограждающих конструкциях зданий по критерию класс бетона по прочности и теплопроводности.

По результатам анализа патентных исследований из технических предложений повышения качества цементных пенобетонов наиболее востребованным является технологический прием введения модифицирующих добавок. Современные добавки существенно отличаются по своему составу и функциональному воздействию, что необходимо учитывать при управлении качеством смесей и получении пенобетонов с заданными свойствами.

Одной из новых и эффективных модифицирующих добавок, рекомендуемых в строительном материаловедении для управления процессом структурообразования цементных строительных смесей, является глиоксаль. Глиоксаль обладает высокой химической активностью по отношению к процессу гидратации и гидролизу минералов портландцемента [14].

В щелочной среде цементного теста глиоксаль реагирует с гидроксидом кальция, образуя гликолят кальция:



Данная реакция сопровождается выделением тепла и увеличением объема, что объясняется интенсивным образованием гликолята кальция $(HO-CH_2-COO)_2Ca$ в процессе гидратации цемента. Авторами сделано предположение, что введение глиоксаля в цементную пенобетонную смесь может существенно снизить усадочные деформации пенобетона. Исследования в этом направлении ранее не проводились.

Для проведения исследований использовали: портландцемент Топкинского цементного завода ПЦ ЦЕМ I 42.5 Н, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 30515–2013; песок Кудровского месторождения Томской области с модулем крупности 1,8, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736–2014 и ГОСТ 26633–2012; водопроводная вода, соответствующая требованиям ГОСТ 23732–2011. Для получения пены применялся синтетический пенообразователь ПБ-2000 (ТУ 2481-185-05744685–01). В качестве модифицирующей добавки применялся глиоксаль кристаллический (ТУ 2633-004-67017122–2011). Содержание глиоксаля кристаллического в добавке – 84,4 %, сорт А.

Испытания пенобетона естественного твердения проводились в аккредитованном испытательном центре «Стромтест», лабораториях кафедры «Строительные материалы и технологии», а также НИИСМ ТГАСУ с использованием стандартных методов испытаний.

Из известных технологий приготовления пенобетонной смеси наиболее эффективной является одностадийная технология, которая позволяет регулировать гидродинамические, массообменные и энергетические характеристики и осуществлять управление процессами формирования структуры пенобетонов, прежде всего, на ранних стадиях. Данная технология принята при проведении исследований и разработке технологии малоусадочных пенобетонов высокого уровня и стабильности качества. По технологии в смеситель заливается предварительно отдозированная вода, вводится модифицирующая добавка в необходимом количестве. Перемешивание добавок с водой осуществляют 1 мин. Далее в смеситель загружаются песок, цемент, и перемешивание продолжается еще в течение 2 мин до получения однородной пластичной массы. В полученную смесь добавляется раствор пенообразователя, и все компоненты перемешиваются 4,5 мин.

Готовую пенобетонную смесь укладывают в металлические формы с очищенной и смазанной внутренней поверхностью. Отформованные образцы пенобетона выдерживают при температуре 20 ± 2 °С в течение суток, после чего их освобождают и помещают в камеру нормального твердения, где хранят до проведения испытаний при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха не менее 90 %. Испытание и оценка качества пенобетона проводились по ГОСТ 25485–89.

Если принять во внимание предположение Гриффитса о том, что эталонном прочности в некотором объеме бетона служит минимально прочный его элемент, то решение задачи сводится к нахождению «слабого звена цепи». «Цепное» решение задачи несёт в себе некоторую долю погрешности, т. к.

в бетоне звенья расположены как последовательно, так и параллельно. Однако полученное решение даст представление о порядке цифр, из чего, в свою очередь, следует, что прочность бетона не может однозначно характеризоваться одной лишь средней величиной. Необходимо указывать возможные вариации прочностной характеристики, а также величину и форму исследуемых образцов на заводе-изготовителе.

Исходя из вышесказанного, для каждой партии пенобетона вычисляют среднее квадратическое отклонение S_m и коэффициент вариации V_m прочности на сжатие и средней плотности по формулам (3) – (4) согласно ГОСТ 10180–2012:

$$S_m = \frac{W_m}{\alpha}, \quad (3)$$

где W_m – размах единичных значений прочности и средней плотности пенобетона в контролируемой партии, определяемый как разность между максимальным и минимальным единичными значениями прочности (МПа) и средней плотности ($\text{кг}/\text{м}^3$); α – коэффициент, зависящий от числа единичных значений (n) и принимаемый по табл. 1.

Таблица 1

Коэффициент α

Число единичных значений n	2	3	4	5	6
Значение коэффициента α	1,13	1,69	2,06	2,33	2,5

$$V_m = \frac{S_m}{R_m} 100, \quad V_m = \frac{S_m}{\rho_m} 100, \quad (4)$$

где R_m – фактическая прочность при сжатии пенобетона; ρ_m – фактическая плотность пенобетона в сухом состоянии.

Полученное значение коэффициента вариации применяют для расчета класса бетона.

Соотношение между маркой M ($\text{кгс}/\text{см}^2$) и классом B (МПа) бетона выражается формулой

$$B = M(1 - \sigma \cdot V) 0,098, \quad (5)$$

где σ – отклонение от среднего значения, выраженное в стандартах, нормативное значение 1,645, соответствующее обеспеченности 0,95; V – коэффициент вариации прочности бетона; 0,098 – коэффициент для перехода от $\text{кгс}/\text{см}^2$ к МПа.

Для определения и обоснования контрольного состава и режимов приготовления пенобетонной смеси были проведены экспериментальные исследования влияния технологических приемов на однородность параметров качества: прочности на сжатие, средней плотности и усадки при высыхании. После чего была проведена оптимизация технологических режимов с помощью математического планирования эксперимента. Поиск оптимума осуществлялся по ключевым технологическим факторам: песчано-цементное отношение, водотвердое отношение и время перемешивания пенобетонной смеси. Из анализа результатов исследования установлено, что существенно снизить усадочные деформации и повысить однородность параметров качества одними

только технологическими приемами невозможно. Поэтому для дальнейших исследований в пенобетонную смесь вводился глиоксаль кристаллический. Определение оптимальной дозировки модифицирующей добавки в поризованные смеси приведено в работе [15].

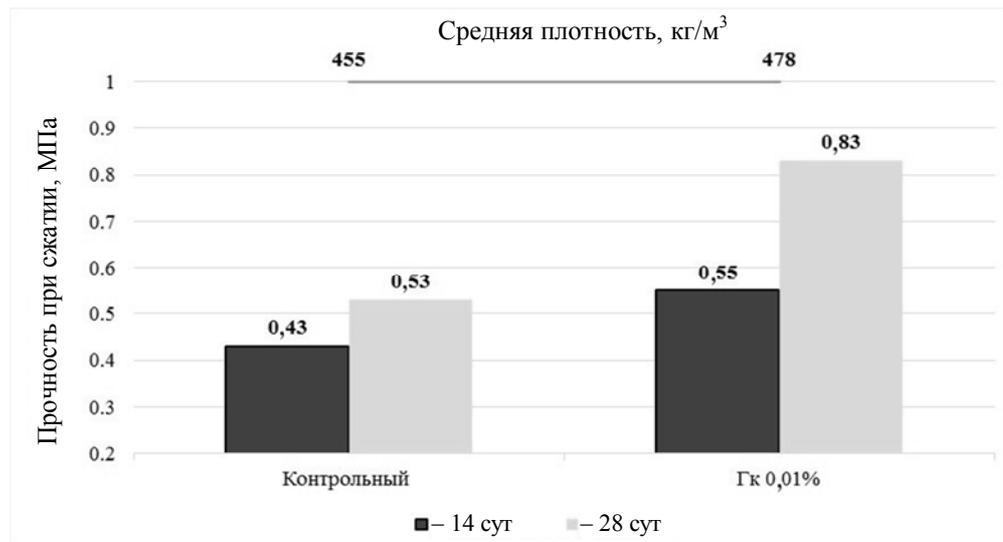
На основе методики СН-277, а также данных, полученных при оптимизации технологических режимов приготовления пенобетонной смеси, были разработаны составы теплоизоляционного пенобетона с применением глиоксаля кристаллического. Рекомендуемые составы пенобетонов с маркой по средней плотности D500 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Разработанные составы пенобетона

Вид пенобетона	Расход цемента, кг	Расход песка, кг	Расход воды, л	Расход ПБ-2000, л	Расход добавки, кг
Без добавок	300	150	225	1,3	–
С глиоксалем кристаллическим	300	150	225	1,3	0,03

Результаты исследований по определению значений прочности на сжатие и средней плотности образцов пенобетона с добавками и без представлены на рисунке.



Влияние глиоксаля кристаллического на прочность при сжатии и среднюю плотность пенобетона

Главными критериями оценки однородности параметров качества приняты прочность и средняя плотность. На «предел прочности при сжатии пенобетона влияют многие факторы: физические и химические характеристики компонентов смеси и их пропорции», пористость, возраст, влажность [1, с. 24], а также усадка при эксплуатации. Между средней плотностью

и прочностью существует пропорциональная зависимость [1, с. 24]. Пенобетон без добавок обладает неоднородной структурой и, как следствие, высокими усадочными деформациями. Причиной высокой усадки образцов является менее совершенная структура пор.

По полученным экспериментальным результатам исследований установлено уменьшение усадочных деформаций на 50 % пенобетона естественного твердения при введении в состав глиоксаля кристаллического по сравнению с бездобавочным составом [16]. Существенное снижение усадочных деформаций при естественном твердении пенобетона позволяет прогнозировать пониженный уровень формирования напряжений при структурообразовании в объеме пенобетона и, как следствие, повышенную эксплуатационную надежность изделий (конструкций), изготовленных из этого материала.

При введении кристаллического глиоксаля в количестве 0,01 % от массы цемента наблюдается незначительное увеличение средней плотности пенобетона, при этом прочность на сжатие увеличивается на 56 % (0,83 МПа). Увеличение содержания кристаллического глиоксаля в пенобетонной смеси приводит к ухудшению технических свойств и удорожанию пенобетонной продукции.

Данные по статистической обработке результатов измерений средней плотности и прочности при сжатии пенобетона представлены в табл. 3 и 4. Класс бетона рассчитан по формуле (5).

Таблица 3

Статистическая обработка данных по средней плотности пенобетона

№ п/п	Вид пенобетона	Средняя плотность, кг/м ³	Среднее значение, кг/м ³	Марка бетона по средней плотности	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации
1	Без добавок	463	455,2	D500	15,6	3,4
2		436				
3		450				
4		441				
5		475				
6		466				
1	С кристаллическим глиоксалем	470	478,6	D500	10,4	2,2
2		470				
3		470				
4		496				
5		485				
6		481				

Как показывают экспериментальные результаты, разброс прочности при сжатии и средней плотности изделий находится в статистически допустимых пределах. Коэффициент вариации прочности при сжатии пенобетона не превышает 10,5 и 3,4 % для средней плотности, что свидетельствует о стабильности технологических процессов. Нормативным значением данного параметра является 15 % для прочности на сжатие и 5 % для средней плотности пенобетона.

Таблица 4

Статистическая обработка данных по прочности при сжатии пенобетона

№ п/п	Вид пенобетона	Прочность, МПа	Среднее значение, МПа	Класс по прочности на сжатие	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации, %
1	Без добавок	0,59	0,53	В0.5	0,055	10,5
2		0,49				
3		0,57				
4		0,45				
5		0,50				
6		0,59				
1	С кристаллическим глиоксалем	0,71	0,83	В0.75	0,06	7,6
2		0,81				
3		0,84				
4		0,78				
5		0,77				
6		0,86				

Введение оптимального количества глиоксаля кристаллического в пенобетонную смесь позволило снизить коэффициент вариации средней плотности с 3,4 до 2,2 % и прочности при сжатии пенобетона с 10,5 до 7,6 % в сравнении с образцом без добавок. В результате был повышен класс пенобетона до В0.75 с применением глиоксаля кристаллического при сохранении марки по средней плотности D500.

Образцы с глиоксалем кристаллическим с пониженной усадкой при высыхании имеют низкий коэффициент вариации средней плотности и прочности на сжатие при его улучшенном значении по сравнению с контрольным образцом без добавок.

Данные показатели доказывают влияние усадки на уровень и стабильность качества пенобетона.

Разработанные составы пенобетона и практические рекомендации по осуществлению технологии его изготовления использовались при разработке ТУ 5741-087-00884306–2015 «Стеновые блоки из теплоизоляционного пенобетона модифицированного с пониженной усадкой» и технологического регламента на производство блоков стеновых из теплоизоляционного пенобетона, а также при проведении опытно-промышленных испытаний на производственных площадях ООО ПКФ «БЕТТА», г. Томск. Характеристики используемых сырьевых материалов при проведении производственной апробации близки к применяемым при разработке составов и проведении лабораторных исследований. При проведении испытаний использовалась последовательность технологических процессов: приготовление пенобетонной смеси, формование изделий, естественное твердение. Пенобетонная смесь перемешивалась в смесителе турбулентного типа. Готовая смесь заливалась на полный объем в формы. Изделия после распалубки на поддоне отправлялись на склад готовой продукции. Характеристики пенобетона изготовленных изделий представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Результаты промышленных испытаний пенобетонных изделий
с глиоксалем кристаллическим**

№ п/п	Показатели	Значения
1	Средняя плотность, кг /м ³	485
2	Коэффициент вариации средней плотности, %	3,05
3	Прочность на сжатие, МПа	0,93
4	Коэффициент вариации прочности на сжатие, %	8,0
5	Класс по прочности на сжатие, МПа	0,75
6	Усадка при высыхании, мм/м	1,43

Промышленная апробация подтвердила достоверность полученных результатов исследования, что позволяет рекомендовать разработанную технологию пенобетона улучшенного качества для использования в реальном секторе строительного комплекса.

Введение добавки глиоксала кристаллического в пенобетонную смесь в количестве 0,01 % от массы цемента позволило снизить коэффициент вариации средней плотности с 3,4 до 2,2 %, прочности при сжатии пенобетона с 10,5 до 7,6 %. В результате получен теплоизоляционный пенобетон более высокого класса В0.75 при сохранении марки по средней плотности D500.

Выводы

1. Установлено, что при введении добавки глиоксала кристаллического в пенобетонную смесь в количестве 0,01 % от массы цемента снижаются коэффициенты вариации средней плотности с 3,4 до 2,2 % и прочности при сжатии пенобетона с 10,5 до 7,6 %. При введении в пенобетонную смесь глиоксала кристаллического повышается класс пенобетона до В0.75 при сохранении марки по средней плотности D500.

2. Для организации технологии теплоизоляционного пенобетона с малой усадкой, повышенным уровнем и стабильностью качества, а также производства изделий разработаны практические рекомендации в виде технологического регламента и технических условий. Промышленные испытания составов и технологических приемов приготовления пенобетонной смеси подтвердили достоверность научных результатов и практических рекомендаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Учет особенностей структуры сырья* в технологии пенобетонов / Л.В. Моргун, В.Н. Моргун, П.В. Смирнова, М.О. Бацман // Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве : сб. тр. – Севастополь, 2007. – С. 202–207.
2. *Удачкин, В.И.* Малоусадочный неавтоклавный пенобетон для сборного и монолитного строительства : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2000. – 7 с.
3. *Меркин, А.П.* Ячеистые бетоны: научные и практические предпосылки дальнейшего развития / А.П. Меркин // Строительные материалы. – 1995. – № 2. – С. 11.
4. *Пухаренко, Ю.В.* Свойства и перспективы применения ячеистого фибропенобетона / Ю.В. Пухаренко // Популярное бетоноведение. – 2006. – № 1. – С. 30–33.

5. Пинскер, В.А. Ячеистый бетон как испытанный временем материал для капитального строительства / В.А. Пинскер, В.П. Вылегжанин // *Строительные материалы*. – 2004. – № 3. – С. 44–45.
6. Шахова, Л.Д. Роль пенообразователей в технологии пенобетонов / Л.Д. Шахова // *Строительные материалы*. – 2007. – № 4. – С. 16–20.
7. Коломацкий, А.С. Теплоизоляционный пенобетон / А.С. Коломацкий, С.А. Коломацкий // *Строительные материалы*. – 2002. – № 3. С. 18–19.
8. Пименова, Л.Н. Пенобетон, модифицированный силикагелем / Л.Н. Пименова, А.И. Кудряков // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2013. – № 2. – С. 229–233.
9. Кудряков, А.И. Пенобетон дисперсно-армированный теплоизоляционный естественного твердения / А.И. Кудряков, А.Б. Стешенко // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2014. – № 2. – С. 127–133.
10. Girniene, I. The effect of the hardening conditions on foam cement concrete strength and phase composition of new formations / I. Girniene, A. Laukaitis // *Materials Science*. – 2002. – № 1. – P. 77–82.
11. *Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction* / Z. Zuhua, L. John, Provis, R. Andrew, W. Hao // *Construction and Building Materials*. – 2014. – V. 56. – P. 113–127.
12. *Cement Based Foam Concrete Reinforced by Carbon Nanotubes* / G. Yakovlev, J. Keriene, A. Gailius, I. Girniene // *Materials Science*. – 2006. – V. 12. – № 2. – P. 147–151.
13. Ткаченко, Г.А. Пенобетоны на природных кварцевых песках / Г.А. Ткаченко, Е.В. Измалкова, Н.В. Мальцев // *Строительство : материалы Междунар. конф.* – Ростов н/Д, 2004. – С. 47–48.
14. Горленко, Г.П. Процессы структурообразования в системе «цемент – вода» при введении химической добавки глиоксаля / Г.П. Горленко, Ю.С. Саркисов, В.А. Волков // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2014. – № 2. – С. 278–284.
15. Kudyakov, A.I. Study of Hardened Cement Paste with Crystalline Glyoxal / A.I. Kudyakov, A.B. Steshenko // *Key Engineering Materials*. – 2016. – V. 683. – P. 113–117.
16. Стешенко, А.Б. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой / А.Б. Стешенко, А.И. Кудряков // *Инженерно-строительный журнал*. – 2015. – № 2. – С. 56–52.

REFERENCES

1. Morgun L.V., Morgun V.N., Smirnova P.V., Batsman M.O. Uchet osobennosti struktury syr'ya v tekhnologii penobetonov [Structural properties of raw materials in foamed concrete technology]. *Coll. Papers 'Theory and practice of production and application of cellular concrete in construction'*. Sevastopol. 2007. Pp. 202–207. (rus)
2. Udachkin V.I. Malousadochnyi neavtoklavnyi penobeton dlya sbornogo i monolitnogo stroitel'stva: avtoref dis. ... kand. tekhn. nauk [Not shrink non-autoclaved aerated concrete for precast and monolithic construction. PhD Abstract]. Moscow, 2000. 7 p. (rus)
3. Merkin A.P. Yacheistyie betony: nauchnye i prakticheskie predposylki dal'neishego razvitiya [Cellular concrete: scientific and practical background for further development]. *Construction Materials*. 1995. No. 2. Pp. 11. (rus)
4. Pukhareno Yu.V. Svoistva i perspektivy primeneniya yacheistogo fibropenobetona [Properties and prospects of cellular fiber foamed concrete]. *Populyarnoe betonovedenie*. 2006. No 1. Pp. 30–33. (rus)
5. Pinsker V.A., Vylegzhanin V.P. Yacheisty beton kak ispytanniy vremenem material dlya kapital'nogo stroitel'stva [Foamed concrete is time-tested material for major construction]. *Construction Materials*. 2004. No. 3. Pp. 44–45. (rus)
6. Shahova L.D. Rol' penoobrazovatelei v tekhnologii penobetonov [The role of foaming agents in foamed concrete technology]. *Construction Materials*. 2007. No. 4. Pp. 16–20. (rus)
7. Kolomackij A.S. Teploizolyatsionnyi penobeton [Heat-insulating foamed concrete]. *Construction Materials*. 2002. No. 3. Pp. 18–19. (rus)

8. *Pimenova L.N., Kudyakov A.I.* Penobeton, modifitsirovannyi silikagelem [Foamed concrete modified with silica gel]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 229–233. (rus)
9. *Kudyakov A.I., Steshenko A.B.* Penobeton dispersno-armirovannyi teploizolyatsionnyi estestvennogo tverdeniya [Heat insulating reinforced air hardened foamed concrete]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 2. Pp. 127–133. (rus)
10. *Girniene I., Laukaitis A.* The effect of the hardening conditions on foam cement concrete strength and phase composition of new formations. *Materials Science*. 2002. No. 1. Pp. 77–82.
11. *Zuhua Z., John L., Provis, Andrew R., Hao W.* Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2014. V. 56. Pp. 113–127.
12. *Yakovlev G., Keriene J., Gailius A., Girniene I.* Cement based foam concrete reinforced by carbon nanotubes. *Materials Science*. 2006. V. 12. No. 2. Pp. 147–151.
13. *Tkachenko G.A., Izmailova E.V., Mal'cev N.V.* Penobetony na prirodnykh kvartsevykh peskakh [Foamed concretes based on natural quartz sands]. *Proc. Int. Conf. 'Construction'*. Rostov-on-Don. 2004. Pp. 47–48. (rus)
14. *Gorlenko G.P., Sarkisov Yu.S., Volkov V.A.* Protsessy strukturoobrazovaniya v sisteme «tsement–voda» pri vvedenii khimicheskoi dobavki glioksalya [Structure formation in cement-water system after glyoxal introduction]. *Russian Physics Journal*. 2014. No. 2. Pp. 278–284. (rus)
15. *Kudyakov A.I., Steshenko A.B.* Study of hardened cement paste with crystalline glyoxal. *Key Engineering Materials*. 2016. V. 683. Pp. 113–117.
16. *Kudyakov A.I., Steshenko A.B.* Rannee strukturoobrazovanie penobetonnoi smesi s modifitsiruyushchei dobavkoi [Early structure formation of foamed concrete mix with modifying additive]. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. No. 2. Pp. 56–52. (rus)