

На правах рукописи



ПОПОВ МАКСИМ ЮРЬЕВИЧ

**ЛЕГКИЙ БЕТОН
НА ОСНОВЕ ГРАНУЛИРОВАННОГО ПЕНОСТЕКЛА**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

- Научный руководитель** – доктор технических наук, профессор,
Ким Борис Григорьевич
- Официальные оппоненты** – **Хозин Вадим Григорьевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО "Казанский
государственный архитектурно-
строительный университет"
- **Баканов Максим Олегович**
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО "Ивановская пожарно-
спасательная академия ГПС МЧС
России"
- Ведущая организация** – ФГБОУ ВО "Ивановский
государственный химико-
технологический университет"

Защита состоится «22» января 2016 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.355.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет», по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8-го Марта, д. 20, ауд. Г-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (www.ivgpu.com).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Заянчуковская Н.В.

Актуальность темы исследования. В связи с ужесточением требований, предъявляемых к энергоэффективности зданий и сооружений, строительная отрасль нуждается в материалах, обеспечивающих не только необходимую несущую способность конструкций, но и обладающих низкими значениями теплопроводности. К таким материалам можно отнести легкие бетоны на пористых заполнителях.

Гранулированное пеностекло (ГПС) является перспективным заполнителем для применения в легких бетонах. По сравнению с пенополистиролом, керамзитом, перлитом, вермикулитом и другими пористыми заполнителями, ГПС имеет высокие физико-механические и теплотехнические характеристики.

Химический состав пеностекла отличается высоким содержанием реакционноспособного кремнезема, что потенциально является причиной проявления щелоче-силикатных реакций (ЩСР) при его использовании в бетонах на цементном вяжущем. В то же время высокая пористость заполнителя может нивелировать протекание негативных химических процессов. Таким образом, актуальным является исследование свойств легкого бетона с пористым заполнителем на основе гранулированного пеностекла (ГПС-бетона) с углубленным изучением проявления в нем ЩСР.

Степень разработанности темы исследования. Преимущества применения ГПС в качестве заполнителя для легких бетонов было рассмотрено в ряде отечественных и зарубежных работ. Разработанные легкие бетоны на основе ГПС имеют высокие характеристики по сравнению с аналогами, однако сохранение их физико-механических и теплотехнических свойств в долгосрочной перспективе не рассматривалось. В настоящее время в научном сообществе наблюдается отсутствие однозначности представлений о безопасности применения ГПС в цементных системах, что является причиной необходимости проведения более глубокого, комплексного изучения проявления ЩСР в ГПС-бетонах.

Цели и задачи исследования. Цель работы – разработка легких бетонов на пористом заполнителе из гранулированного пеностекла с учетом щелоче-силикатных взаимодействий между заполнителем и цементным камнем.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- изучение вещественного состава, строения и физико-химических особенностей ГПС как легкого заполнителя для бетона;
- разработка методики исследования ГПС на определение реакционной способности к проявлению ЩСР в ГПС-бетоне при различных условиях его эксплуатации;
- изучение механизма взаимодействия реакционноспособного пористого заполнителя со щелочами бетона;
- разработка мер, препятствующих протеканию ЩСР в системе «реакционноспособный пористый заполнитель – цементный камень»;

– разработка составов ГПС-бетона с учетом особенностей его эксплуатации в различных климатических условиях.

Научная новизна работы. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения легкого бетона на основе реакционно-способного пористого заполнителя с пониженным влиянием щелоче-силикатных взаимодействий на процессы деструкции ячеистой матрицы заполнителя при эксплуатации бетона. Рациональным способом снижения степени деструкции в теле реакционноспособного пористого заполнителя по причине ЩСР является применение мер, препятствующих доступу щелочей к заполнителю из цементной матрицы и внешней среды посредством снижения содержания щелочей в цементном камне и структурных преобразований в межфазной зоне «пористый заполнитель – цементный камень».

Изучен механизм взаимодействия реакционноспособного пористого заполнителя со щелочами бетона, отличающийся от механизма протекания щелоче-силикатных взаимодействий в тяжелых и мелкозернистых бетонах и заключающийся в структурных преобразованиях аморфного кремнезема заполнителя в низкоосновные гидросиликаты кальция, сопровождаемых трещинообразованием в стенках гранулы и накоплением щелочных солей кремниевой кислоты внутри пор заполнителя без образования продуктов реакции на границе раздела фаз «пористый заполнитель – цементный камень». Таким образом, ЩСР в ГПС-бетоне не приводят к появлению внутренних осмотических давлений, а способствуют лишь его частичной деструкции в объеме заполнителя.

Предложена методика исследования пористых заполнителей на определение их реакционной способности к проявлению ЩСР в бетоне, заключающаяся в применении существующей методики, описанной в ГОСТ 8269.0-97, а также применении отличающихся от данной методики: химико-минералогических исследований; фракционного состава заполнителя при определении содержания в нем растворимого кремнезема и при изготовлении из него образцов-балочек для ускоренных испытаний на расширение; проведении дополнительных микроструктурных и физико-механических исследований этих образцов после испытания.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработаны меры, подавляющие щелоче-силикатные взаимодействия в системе «реакционноспособный пористый заполнитель – цементный камень».

Предложены составы легкого ГПС-бетона с плотностью 400–800 кг/м³, прочностью 2,1–6,5 МПа, коэффициентом теплопроводности в сухом состоянии 0,09–0,15 Вт/(м·К). Установлены зависимости основных физико-механических характеристик разработанного бетона от его состава.

Разработанные составы проранжированы по эффективности применения в зависимости от условий эксплуатации ГПС-бетона с учетом обеспечения сохранения его физико-механических и теплотехнических характеристик с течением времени.

Методология и методы исследования. Исследования проводились с использованием общепринятых физико-механических и физико-химических методов оценки свойств материалов.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности получения легкого бетона на основе реакционноспособного пористого заполнителя с пониженным влиянием щелоче-силикатных взаимодействий на долговечность материала;
- методика исследования пористых заполнителей на определение реакционной способности к проявлению ЩСР в бетоне;
- механизм взаимодействия реакционноспособного пористого заполнителя со щелочами бетона;
- механизм действия мер, препятствующих протеканию ЩСР в ГПС-бетоне, на процессы структурообразования под действием щелоче-силикатных взаимодействий;
- составы легкого бетона с применением гранулированного пеностекла марки «НеоПорм»;
- результаты апробации.

Степень достоверности и апробация результатов. Высокая степень достоверности результатов обеспечивается методически обоснованным комплексом испытаний с использованием как стандартных средств измерений, так и современных методов научных исследований, а также опытными испытаниями и их положительными практическими результатами.

Основные положения диссертационной работы были представлены на: международной научно-практической конференции «Инновационные материалы и технологии» (Белгород, 2011 г.); XII и XIII международных научных конференциях «Стародубовские чтения» (Днепропетровск, 2012 г., 2013г.); всероссийской молодежной школе «Химия и технология полимерных и композиционных материалов» (Москва, 2012 г.); 6-th International Scientific Conference «Architecture, civil engineering – modernity» (Варна, 2013 г.); III Всероссийская (международная) конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – взгляд в будущее» (Москва, 2014 г.), 2nd International Conference Innovative materials, structures and technologies (Рига, 2015 г.).

Внедрение результатов исследования. Апробация полученных результатов экспериментальных исследований, связанных с получением легкого бетона на основе гранулированного пеностекла, осуществлялась на предприятии ОАО «Компания «СТЭС-Владимир». На базе предприятия была выпущена опытно-промышленная партия блоков из ГПС-бетона.

Теоретические положения диссертационной работы, результаты экспериментальных исследований и промышленного внедрения используются в учебном процессе при подготовке: бакалавров и магистров по направлению 270800 «Строительство» (ВЛГУ).

Личный вклад. Личный вклад автора в решение исследуемой проблемы состоит в разработке программы экспериментальных исследований, получении результатов исследований, их обобщении и анализе.

Публикации. Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 10 научных публикациях, в том числе в 3 публикациях в российских научных журналах, рецензируемых ВАК.

Структура диссертации. Диссертация состоит из пяти глав, общих выводов, библиографического списка и приложения. Работа изложена на 167 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок, 38 таблиц, библиографический список из 139 наименований, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования, научная новизна и практическая значимость выбранного направления исследования.

Первая глава посвящена аналитическому обзору состояния вопроса и основных задач исследования.

В связи с ужесточением требований, предъявляемых к энергоэффективности зданий и сооружений, строительная отрасль нуждается в материалах, обеспечивающих не только необходимую несущую способность конструкций, но и обладающих низкими значениями теплопроводности. К таким материалам можно отнести легкие бетоны на пористых заполнителях. Преимущества легких бетонов были отражены в фундаментальных работах Ю.М. Баженова, Г.И. Горчакова, К.Д. Некрасова, А.Г. Комара. Теоретические и практические исследования по теме легких бетонов, в том числе бетонов на пористых заполнителях, проводились Г.С. Бурлаковым, К.Э. Горяиновым, Г.А. Бужевичем, В.И. Савиным, В.В. Строковой, И.Л. Чулковой, С.В. Федосовым, В.Ф. Степановой, В.Г. Хозиным, М.В. Акуловой, Б.В. Гусевым.

Среди пористых заполнителей, таких как пенополистирол, керамзит, вспученный перлит, вермикулит и др., гранулированное пеностекло (ГПС), благодаря равномерно распределенной структуре ячеек, замкнутости пор и развитой шероховатой поверхности, способствует получению легких бетонов с улучшенными физико-механическими и теплотехническими характеристиками. К числу первых в стране исследований, посвященных разработке пеностекла, можно отнести работы И.И. Китайгородского, Б.К. Демидовича, Л.К. Казанцевой. Применение ГПС в качестве заполнителя для легких бетонов было рассмотрено в работах А.Н. Давидюка, С.М. Ивановой, А.А. Кетова, С.И. Пузанова.

В силу высокого содержания аморфного кремнезема в составе ГПС существует необходимость комплексного исследования проявления щелоче-силикатных реакций (ЩСР) в легких бетонах на основе гранулированного пеностекла (ГПС-бетонах). Данный вид коррозии впервые был обнаружен Т. Стэнтоном в США в 1940-х годах. В нашей стране проблемой протекания ЩСР в бетонах занимались Г.С. Рояк, В.М. Москвин, В.Н. Вернигорова,

Н.К. Розенталь, Г.В. Любарская, А.С. Брыков. В настоящее время в научном сообществе наблюдается отсутствие однозначности представлений о безопасности применения ГПС в цементных системах, что является причиной необходимости проведения более глубокого, комплексного изучения проявления ЩСР в ГПС-бетонах.

Анализ имеющихся данных об изучении свойств ГПС-бетонов позволили сформулировать рабочую гипотезу данного исследования, заключающуюся в возможности получения легких бетонов на основе ГПС с высокими физико-механическими и теплотехническими характеристиками, сохраняющих свои свойства в течение всего срока эксплуатации без необратимых последствий протекания ЩСР в теле бетона.

Во второй главе приведены характеристики применяемых материалов и описания экспериментальных методов.

В качестве сырьевых материалов применялись: гранулированное пеностекло марки «Неопорм» ЗАО «Компания «СТЭС-Владимир», г. Владимир. В качестве вяжущего использовался портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н и низкощелочной ЦЕМ I 42,5 Н НЩ ДП фирмы ООО «Азия Цемент», Пензенская обл. В качестве пуццолановых добавок использовалась зола-унос Ново-троицкой ТЭС и микрокремнезем марки МКУ- 85, г. Новокузнецк.

Исследование физико-механических и теплотехнических свойств ГПС-бетона осуществлялось по стандартным методикам ГОСТ.

В третьей главе работы была предложена методика исследования применяемого заполнителя на определение его реакционной способности к проявлению ЩСР в ГПС-бетоне, заключающаяся в применении методики, описанной в ГОСТ 8269.0-97, которая адаптировалась к исследованию пористого ГПС с учетом его химико-структурных особенностей (табл. 1). Методика диссертации состояла из четырех последовательных испытаний. Испытания № 1 и № 2 выявляли потенциальную способность заполнителя к взаимодействию со щелочами бетона, а № 3 и № 4 определяли степень проявления ЩСР непосредственно в образцах-балочках из ГПС-бетона.

По результатам испытаний № 1 и № 2 выявлено, что ГПС имеет натрий-кальций-силикатную рентгеноаморфную природу с высоким содержанием растворимого кремнезема. Для проведения испытания № 3 и № 4 подбирался состав легкого конструкционно-теплоизоляционного ГПС-бетона максимальной прочности при плотности до 800 кг/м^3 с применением аппарата математического планирования эксперимента. По полученным уравнениям регрессии установлены зависимости параметров оптимизации: плотности и прочности ГПС-бетона от технологических факторов варьирования: водоцементного отношения и соотношения крупной и мелкой фракций ГПС (рис. 1). Максимальная прочность бетона в 5–6 МПа (при содержании цемента 350 кг/м^3 и плотности $700\text{--}800 \text{ кг/м}^3$) достигается при В/Ц 0,6 и содержании крупной фракции ГПС 30–60 %.

Отличие методики, описанной в ГОСТ, от методики диссертации

№ п/п	Методика ГОСТ	Методика диссертации
1.	Определение содержания реакционноспособного кремнезема в заполнителе с прим.: минерало-петрографического анализа	химико-минерального анализа с применением флуоресцентной спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии
	<i>Содержание аморфного кремнезема в заполнителе не должно превышать 3 %</i>	
2.	Выдерживание в 1М растворе NaOH при 80 °С в течение 24 ч.: заполнителя, измельченного до крупности 0,16–0,315 мм	цельных гранул ГПС заданного фракционного размера
	<i>Количество растворимого кремнезема в растворе после выдерживания в нем гранул не должно превышать 50 ммоль/л</i>	
3.	Выдерживание в 1М растворе NaOH при 80 °С в течение 14 суток бетонных образцов-балочек, изготовленных с прим.: заполнителя фракц. состава, мм: [5,0–2,5] – 10 %; [2,50–1,25] – 25 %; [1,25–0,63] – 25 %; [0,630–0,315] – 25 %; [0,315–0,160] – 15 %	гранул ГПС фракц. состава, мм: [5,0–2,5] – 60 %; [2,50–1,25] – 20 %; [1,25–0,63] – 12,5 %; [0,630–0,315] – 4 %; [0,315–0,160] – 3,5 %, дополнительное проведение микроструктурных исследований после испытания
	<i>Ср. относительное расширение бетонных образцов-балочек в ходе испытания не должно превышать 0,1 %, при условии целостности микроструктуры заполнителя</i>	
4.	Выдерживание в климатической камере при 40 °С и отн. вл. 100 % в течение 12 месяцев бетонных образцов-балочек, изготовленных с прим.: заполнителя фракц. состава, мм: [5,0–2,5] – 10 %; [2,50–1,25] – 25 %; [1,25–0,63] – 25 %; [0,63–0,315] – 25 %; [0,315–0,160] – 15 %	гранул ГПС фракц. состава, мм: [5,0–2,5] – 60 %; [2,50–1,25] – 20 %; [1,25–0,63] – 12,5 %; [0,630–0,315] – 4 %; [0,315–0,160] – 3,5 %, дополнительное проведение микроструктурных и физико-механических исследований после испытания
	<i>Ср. относительное расширение бетонных образцов-балочек в ходе испытания не должно превышать 0,04 %, при условии целостности микроструктуры заполнителя и снижении прочности образцов не более 30 %</i>	

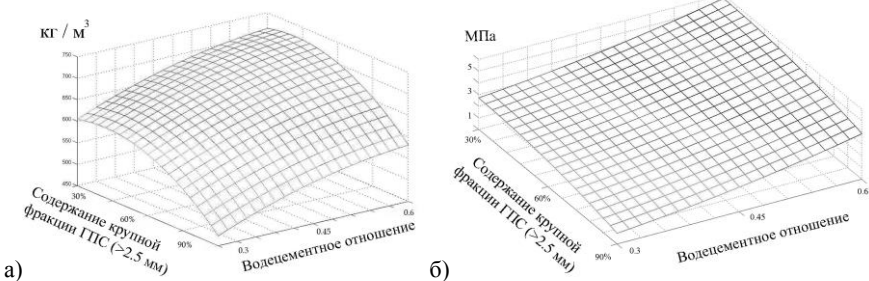


рис. 1. Зависимости плотности (а) и прочности (б) ГПС-бетона от состава

По результатам пройденных испытаний № 3 и № 4 средние относительные расширения образцов-балочек не превысили допустимые пределы и составили 0,055 % и 0,031 % для испытания № 3 и № 4, соответственно (рис. 2).

Согласно микроструктурным исследованиям образцов, после прохождения испытания № 3 в них наблюдается сильное нарушение структуры и обильное трещинообразование в стенках гранул заполнителя (рис. 3 а). Деструктивные процессы прошли не только на поверхности ГПС, но и во внутренних стенках гранулы. Присутствуют трещины и отслоения вдоль границы раздела фаз «пористый заполнитель – цементный камень». Типичные продукты реакции различной морфологии и состава можно наблюдать в порах ГПС (рис. 3 б).

Условия испытания №4 соответствуют более мягким условиям эксплуатации ГПС-бетона. После прохождения испытания №4 структура заполнителя имеет схожий характер разрушения, однако степень деструкции заполнителя и объем силикатного гидрогеля значительно снижается (рис. 3 в, г). После выдерживания образцов-балочек в наиболее мягких условиях: при температуре 20 °С и относительной влажности 60 % (дополнительное испытание), проявления ЩСР практически отсутствуют (рис. 3 д, е).

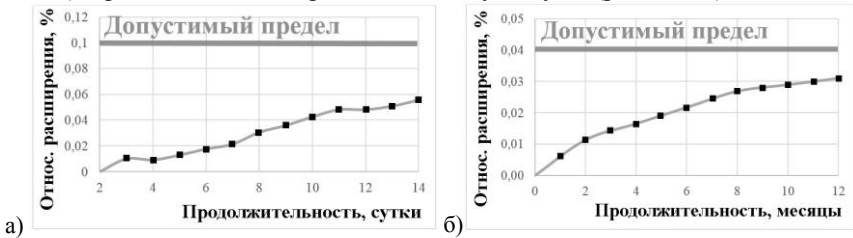


Рис. 2. Результаты ускоренных испытаний на расширение образцов-балочек из ГПС-бетона: а – в 1М растворе NaOH при 80 °С в течение 14 суток; б – после экспозиции в климатической камере при 40 °С и 100 % относительной влажности в течение одного года

На основании полученных результатов был предложен механизм взаимодействия реакционноспособного пористого заполнителя со щелочами бетона, отличающийся от механизма протекания щелоче-силикатных взаимодействий в тяжелых и мелкозернистых бетонах, в которых реакции проходят на границе раздела фаз «плотный заполнитель – цементный камень» с образованием щелочных солей кремниевой кислоты, покрывающих поверхность заполнителя полупроницаемой оболочкой с повышенным содержанием кальция. Эти образования представляют собой вязкие гели, способные сорбировать воду и создавать внутренние напряжения, разрушающие бетон (рис.4 а, б). Механизм щелоче-силикатных взаимодействий в легких бетонах на пористых заполнителях заключается в структурных преобразованиях аморфного кремнезема заполнителя в низкоосновные гидросиликаты кальция, сопровождаемых трещинообразованием в стенках гранулы и накоплением щелочных солей кремниевой кислоты внутри пор заполнителя без образования продуктов реакции на границе раздела фаз «пористый заполнитель – цементный

камень» (рис. 4 в, г). Таким образом, ЩСР в ГПС-бетоне не приводят к появлению внутренних осмотических давлений, а способствуют лишь его частичной деструкции в объеме заполнителя.

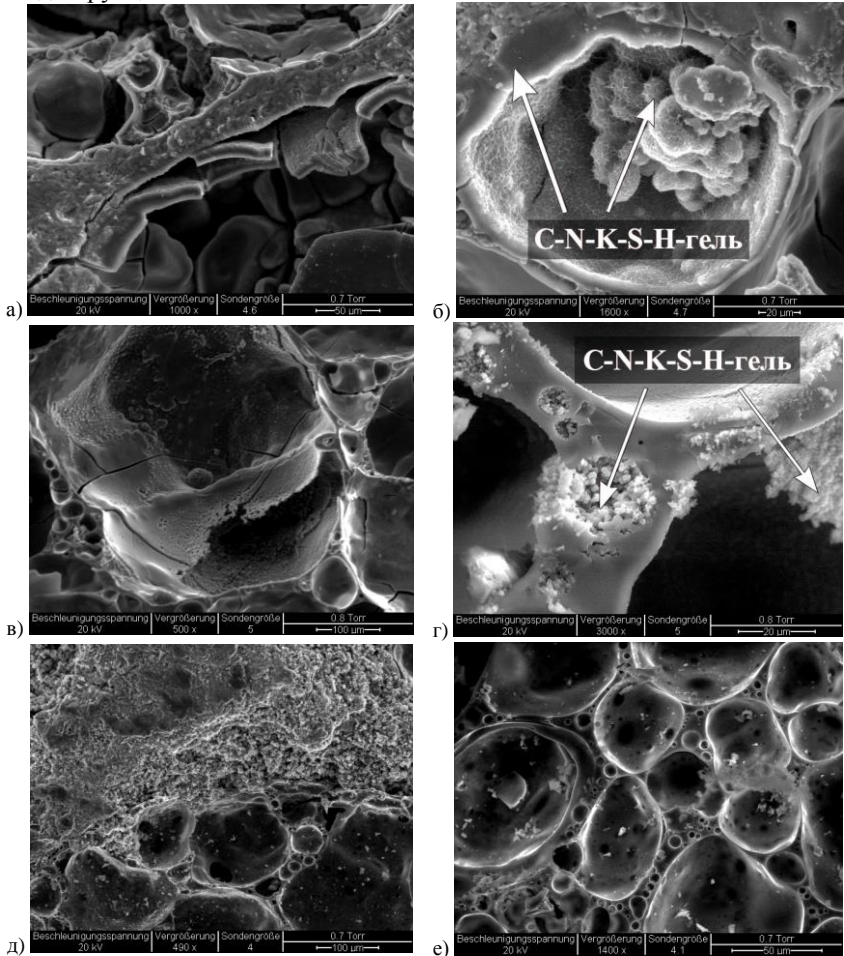


Рис. 3. СЭМ ГПС-бетона после: а, б – 14-суточной экспозиции в 1 М растворе NaOH при 80 °С; в, г – годовой экспозиции в климатической камере при температуре 40 °С и относительной влажности 100 %; д, е – годовой экспозиции в климатической камере при температуре 20 °С и относительной влажности 60 %

Из сравнения результатов испытания № 3 и № 4 сделан вывод, что степень проявления ЩСР в ГПС-бетоне находится в прямой зависимости от условий эксплуатации бетона и, в частности, от степени доступа щелочей из внешней

среды, которая, в свою очередь, зависит от множества климатических и техногенных факторов расположения материала в строительной конструкции. Поэтому, при применении ГПС-бетона в неблагоприятных условиях эксплуатации необходимо применение мер, препятствующих протеканию ЩСР.

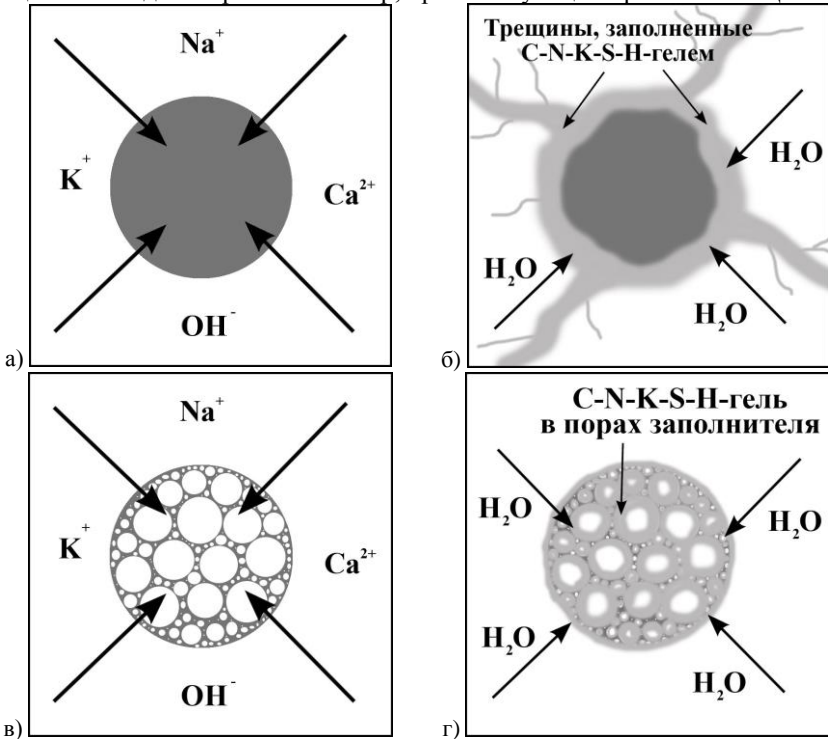


Рис. 4. Схема протекания ЩСР в бетоне при применении:
а, б – плотных заполнителей; в, г – пористых заполнителей

В четвертой главе работы исследовалось влияние различных мер, препятствующих протеканию ЩСР в ГПС-бетонах. В качестве данных мер использовались: цемент с низким содержанием щелочей, а также пуццолановые добавки различной реакционной активности. Цемент для контрольных составов содержал (по эквиваленту оксида натрия Na_2O_e) 0,86–1,13 % щелочей. В качестве низкощелочного цемента (согласно рекомендациям ГОСТ) в работе применялся цемент с $\text{Na}_2\text{O}_e=0,48\text{--}0,62\%$. В качестве пуццолановых добавок были выбраны низкорекреационная зола-унос и высокорекреационный микрокремнезем. Модифицированные образцы проходили испытания № 3 и № 4 методики диссертации. Эффективность используемых способов ингибирования ЩСР оценивалась по снижению значения относительного расширения

модифицированных образцов по сравнению с образцами контрольного состава (табл. 2).

Степень протекания ЩСР в ГПС-бетоне находится в прямой зависимости от количества щелочей в его составе. При содержании в бетоне щелочей (по Na_2O_e) не более 0,62, 1,01 и 2,02 относительные расширения образцов после прохождения испытания № 4 составили 0,012, 0,031 и 0,038, соответственно. Использование низкощелочного цемента способствовало снижению относительных расширений образцов по сравнению с контрольными составами на 16 % и на 60 % после испытания № 3 и № 4, соответственно.

Эффективность ингибирующего действия пуццолановых добавок зависит от их типа и содержания в бетоне. Снижение относительных расширений образцов после прохождения испытаний составляет до 32–42% и 55–65% при использовании золы-уноса и микрокремнезема, соответственно. Согласно микроструктурному исследованию, в образцах, модифицированных пуццолановыми добавками по сравнению с контрольными составами наблюдается улучшение однородности межфазной зоны «пористый заполнитель – цементный камень», сокращение числа трещин стенок гранулы и уменьшение объема образованного щелоче-силикатного гидрогеля после прохождения испытания.

Таблица 2

Результаты относительных расширений образцов ГПС-бетона после прохождения испытаний № 3 и № 4 (%) в зависимости от состава

№ п/п	Испытание № 3	Испытание № 4
	Экспозиция в 1 М растворе NaOH при темп. 80 °С в течение 14-ти суток	Экспозиция в климатической камере при темп. 40 °С и отн. вл. 100 % в течение 1 года
	<i>Допустимый предел расширений</i>	
	0,1	0,04
1.	<i>Контрольный состав. Цемент с содержанием щелочей: $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86 - 1,01$, В/Ц 0,6</i>	
	0,055	0,031
2.	<i>Цемент с низким содержанием щелочей: $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,48 - 0,62$, В/Ц 0,6</i>	
	0,046 (– 16 %)*	0,012 (– 61 %)
3.	<i>Цемент с повышенным содержанием щелочей: $\text{Na}_2\text{O}_e = 1,72 - 2,02$, В/Ц 0,6</i>	
	не проводилось	0,038 (+ 23 %)
4.	<i>Цемент с повышенным содержанием щелочей: $\text{Na}_2\text{O}_e = 2,58 - 3,03$, В/Ц 0,6</i>	
	не проводилось	0,039 (+ 26 %)
5.	<i>Пуццолановая добавка: зола-унос, замена 30 % цем. по масс. ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86 - 1,01$), В/Ц 0,6</i>	
	не проводилось	0,027 (– 12 %)
6.	<i>Пуццолановая добавка: зола-унос, добавка 30 % по масс. цем. ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86 - 1,01$), В/Ц 0,7</i>	
	0,032 (– 42 %)	0,023 (– 32 %)
7.	<i>Пуццолановая добавка: микрокремнезем, замена 10 % цем. по масс. ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86 - 1,01$), В/Ц 0,7</i>	
	0,025 (– 55 %)	0,011 (– 65 %)
* В скобках приведено отличие относительного расширения модифицированного образца от образца контрольного состава		

Таким образом установлено, что в благоприятных условиях эксплуатации бетона, обеспечивающих отсутствие обильного воздействия щелочей из

внешней среды, использование низкощелочного цемента (Na_2O_e не более 0,6 %) является действенной мерой против протекания ЩСР. При обильном доступе щелочей из внешней среды данная мера против протекания ЩСР может быть малоэффективной в ГПС-бетоне, что обуславливает необходимость применения пуццолановых добавок.

Механизм действия пуццолановых добавок исследовался на примере 10% замены цемента микрокремнеземом (МК), так как данная мера оказалась наиболее эффективной для подавления ЩСР в исследуемом бетоне. Согласно проведенному количественному минералогическому анализу ГПС-бетона по методу Ритвельда, при выдерживании образцов в обычных условиях (темп. 20°C, отн. влажн. 60 %), содержание фазы портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) в модифицированном микрокремнеземном образце снизилось на 37 %, а содержание аморфной фазы (CSH-геля) увеличилось на 10 % по сравнению с контрольным образцом (табл. 3). В свою очередь, после годового выдерживания в климатической камере (темп. 40°C, отн. влажн. 100 %) в контрольных и модифицированных образцах содержание портландита и аморфной фазы примерно одинаково. Это объясняется тем, что развитие ЩСР в ГПС-бетонах связано не только с содержанием щелочных соединений в цементном камне, но и с наличием фаз портландита на границе раздела фаз «заполнитель – цементный камень». После экспозиции контрольного образца в климатической камере под действием высокой температуры и влажности протекание химических процессов ускоряется. Наблюдается растворение портландита, что способствует доступу щелочей к заполнителю. Микрокремнезем вступает в химическое взаимодействие с гидроксидом кальция и связывает его в низкоосновные гидросиликаты кальция на границе раздела фаз на начальных этапах твердения композита, препятствуя в дальнейшем доступу щелочей к заполнителю.

Таблица 3

Результаты количественного рентгено-фазового анализа образцов по методу Ритвельда, содержание фазы в процентах по массе

Состав и условия испытания	Портландит, $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Аморфная фаза	Прочее
Контрольный состав, темп. 20 °С, отн. влажн. 60 %	6,1	64,1	29,8
Замена 10 % цемента МК, темп. 20 °С, отн. влажн. 60 %	3,8	74,3	21,9
Контрольный состав, темп., 40 °С, отн. влажн. 100 %	3,3	78,4	18,3
Замена 10 % цемента МК, темп. 40 °С, отн. влажн. 100 %	3,3	80,1	16,6

Таким образом, в зависимости от вида пуццолановой добавки, ее ингибирующее действие связано как с общим уплотнением структуры цементного камня непрореагировавшими дисперсными частицами золы-уноса, так и модификацией межфазной зоны «пористый заполнитель – цементный камень» частицами, обладающими пуццолановой активностью. При этом фазовые

превращения цементной матрицы, контактирующей с заполнителем, препятствуют взаимодействию последнего с щелочами, способствуя ингибированию ЩСР.

Для исследования влияния ЩСР на физико-механические и теплотехнические свойства ГПС-бетонов образцы проходили годовую экспозицию в климатической камере (темп. 40 °С и отн. влажн. 100 %), после чего их показатели прочности и теплопроводности сравнивались с контрольными образцами, выдержанными аналогичный срок при обычных условиях (темп. 20 °С и отн. влажн. 60 %). Результаты показали, что теплопроводность образцов практически не изменяется после проведения эксперимента. Основные последствия ЩСР в ГПС-бетонах заключаются в деструкции заполнителя под действием щелочей цемента и щелочей, поступающих из внешней среды. При этом, цементная матрица композита остается целостной, а гранулы изолированными друг от друга. Теплопроводность легкого бетона в сухом состоянии обуславливается количеством газовой фазы в порах заполнителя, объем которой незначительно изменяется в процессе протекания ЩСР в ГПС-бетоне.

При протекании ЩСР в ГПС-бетоне наблюдаются как деструкции заполнителя, снижающие прочностные показатели композита, так и образования щелоче-силикатных гидрогелей в порах ГПС, сорбирующих воду и увеличивающих плотность бетона. В зависимости от состава экспонированных в климатической камере образцов наблюдается снижение их прочности на 20–35 % и увеличение плотности на 2–8 % по сравнению с неэкспонированными контрольными образцами (табл. 4).

Таблица 4

**Сравнения результатов измерения прочности и плотности образцов
после их хранения в течение года при различных условиях**

Состав \ Условия выдерживания образцов	Темп. 20 °С, отн. влажн. 60 %; прочность (МПа) / плотность (кг/м ³) образцов	Темп. 40 °С, отн. влажн. 100 %; прочность (МПа) / плотность (кг/м ³) образцов	Снижение прочности по причине ЩСР, %	Увеличение плотности по причине ЩСР, %
Контрольный состав (Na ₂ O _e =0,86–1,01)	4,16 / 679	2,71 / 726	34,9	6,9
Пуц. добавка: 10 % замена цем. МК, В/Ц 0,7	5,09 / 680	4,99 / 694	2,0	2,1
Пуццолановая добавка: 30 % добавка золы-уноса, В/Ц 0,7	4,52 / 781	3,31 / 831	26,3	6,4
Пуц. добавка: 30% замена цемента золой-уноса, В/Ц 0,6	5,47 / 668	4,13 / 711	26,8	6,4
Цементы с пониженным Na ₂ O _e =0,48–0,62	4,18 / 662	3,32 / 696	24,5	5,1
Повышенное Na ₂ O _e = 1,72–2,02	2,89 / 645	2,13 / 692	20,6	7,3
Повышенное Na ₂ O _e = 2,58–3,03	2,55 / 639	1,71 / 687	32,9	7,5

Прочность контрольного состава после прохождения эксперимента сокращается на 34 %. Это означает, что класс по прочности ГПС-бетона контрольного состава уменьшается по причине ЩСР примерно с В3,5 до В2. Прочность цементного камня в легком бетоне, как правило, во много раз превосходит прочность пористого заполнителя. Поэтому, частичная деструкция заполнителя вследствие ЩСР незначительно влияет на снижение прочности бетона, так как при достаточном количестве цементной составляющей в ГПС-бетоне основные нагрузки передаются по каркасу цементной матрицы. При увеличении содержания щелочей в бетоне, прочность образцов снижается. Для образцов, в которых в качестве мер, препятствующих протеканию ЩСР, использовались как низкощелочной цемент, так и добавка или частичная замена цемента золой-уноса, снижение прочности составляет 20–27%. Применение микрокремнезема способствует минимальному снижению прочности (до 5 %) и приросту плотности образцов (до 2,1 %), что говорит о его наибольшей эффективности для подавления ЩСР в ГПС-бетонах.

На основе полученных данных предложена методика исследования пористых заполнителей на определение их реакционной способности к проявлению ЩСР в бетонах (табл. 5). Условия проведения испытаний подбираются из условий эксплуатации бетона.

Таблица 5

Предложенная методика исследования пористых заполнителей на определение их реакционной способности к проявлению ЩСР в бетонах

<i>Условия эксплуатации бетона:</i>		
«Мягкие условия»	«Средние условия»	«Жесткие условия»
Эксплуатация ГПС-бетона в благоприятных условиях, таких как внутренние стены и перегородки зданий и сооружений.	Эксплуатация ГПС-бетона в обычных условиях, таких как ограждающие конструкции зданий и сооружений в различных климатических зонах РФ.	Эксплуатация ГПС-бетона в условиях, при которых происходит обильное поступление щелочных соединений из окружающей среды, например, в специальных сооружениях и конструкциях, контактирующих с морской водой и химически агрессивными средами.
<i>Условия проведения испытания:</i>		
Выдерживание образцов в течение одного года при темп. 20 °С и отн. влажн. 60 %	Выдерживание образцов в течение одного года при темп. 40 °С и отн. влажн. 100 %	Выдерживание образцов в течение 14 сут. при темп. 80 °С в 1М растворе NaOH
<i>Условия успешного прохождения испытания:</i>		
Отн. расширения образцов не превышают допустимых значений (0,04% и 0,1% для годового и 14-суточного испытания образцов); отсутствие критических деструкций структуры композита; заполнение пор силикатным гидрогелем по объему не более 50%; наблюдаемое снижение прочности по сравнению с неэкспонированными образцами менее 30%.		

На основе проведенных исследований полученные ранее составы ГПС-бетона были модифицированы с применением мер, препятствующих протеканию ЩСР. В итоге были получены составы ГПС-бетонов плотностью 400–

800 кг/м³, прочностью 2,1–6,5 МПа, коэффициентом теплопроводности 0,09–0,15 Вт/м·К (табл. 6).

Таблица 6

Свойства разработанного ГПС-бетона

Класс бетона по плотности	Состав, кг/м ³					Основные характеристики		
	ГПС	Цемент	Зола-унос	Микрокремнезем	Вода	Прочность на сжатие, МПа	Теплопроводность в сухом состоянии, Вт/м·К	Сорбционная влажность, при φ=80 %, %
D 400	180	120			100	2,1 – 2,9	0,09	2,3
	170	110	20		100			
	180	100		10	110			
	170	100	10	10	110			
D 500	170	200			130	3,3 – 4,1	0,11	2,4
	160	150	60		130			
	170	180		10	140			
	160	130	60	10	140			
D 600	160	280			160	4,2 – 4,6	0,13	2,4
	150	210	90		150			
	160	240		20	180			
	150	180	90	10	170			
D 700	140	360			200	4,5 – 5,1	0,14	2,5
	150	250	110		190			
	150	300		30	220			
	150	220	110	20	200			
D 800	130	440			230	5,0 – 6,5	0,15	2,6
	150	300	130		220			
	140	360		40	260			
	140	260	130	30	240			

В результате работы были определены рекомендуемые способы снижения негативных последствий протекания ЩСР в легких бетонах на основе гранулированного пеностекла марки «НеоПорм» в зависимости от температурно-влажностного режима его эксплуатации:

а) «Мягкие условия»: необходимость специальных мер отсутствует.
 б) «Средние условия»: применение пуццолановых добавок высокой активности (микрокремнезем), в сочетании с применением низкощелочных цементов.

в) «Жесткие условия»: применение пуццолановой добавки высокой активности с уплотнением структуры композита золами-уноса. Не рекомендуется использование ГПС-бетонов плотностью ниже 800 кг/м³.

В пятой главе работы была рассмотрена модернизированная технологическая схема производства изделий из ГПС-бетона с использованием мер, препятствующих протеканию ЩСР. Апробация результатов диссертацион-

ной работы осуществлялась на предприятии ОАО «Компания «СТЭС-Владимир». На базе предприятия была выпущена опытно-промышленная партия блоков из ГПС-бетона в количестве 120 шт. Экономическая эффективность разработанного бетона по сравнению с аналогами (до 6–11% по стоимости) обусловлена упрощением технологической схемы производства ГПС-бетона за счет отсутствия необходимости тепловлажностной обработки, а также возможностью перехода от трехслойной ограждающей конструкции к однослойной стене из ГПС-бетонных блоков благодаря улучшенным физико-механическим и теплотехническим свойствам материала.

В заключении диссертации излагаются итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследования:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения легкого бетона на основе реакционноспособного пористого заполнителя с пониженным влиянием щелоче-силикатных взаимодействий на процессы деструкции ячеистой матрицы заполнителя при эксплуатации бетона. Рациональным способом снижения степени деструкции в теле реакционноспособного пористого заполнителя является применение мер, препятствующих доступу щелочей из цементной матрицы и внешней среды к заполнителю. Эффективность данных мер подтверждена ускоренными испытаниями образцов ГПС-бетона.

2. Предложена методика исследования пористых заполнителей на определение их реакционной способности к проявлению ЩСР в бетоне, заключающаяся в применении существующей методики, описанной в ГОСТ 8269.0-97, а также применении отличающихся от данной методики: химико-минералогических исследований; фракционного состава заполнителя при определении содержания в нем растворимого кремнезема и при изготовлении из него образцов-балочек для ускоренных испытаний на расширение; проведении дополнительных микроструктурных и физико-механических исследований этих образцов после испытания.

3. Изучен механизм взаимодействия реакционноспособного пористого заполнителя со щелочами бетона. Данный механизм отличается от механизма протекания щелоче-силикатных взаимодействий в тяжелых и мелкозернистых бетонах и заключается в структурных преобразованиях аморфного кремнезема заполнителя в низкоосновные гидросиликаты кальция, сопровождаемых трещинообразованием в стенках гранулы и накоплением щелочных солей кремниевой кислоты внутри пор заполнителя без образования продуктов реакции на границе раздела фаз «пористый заполнитель – цементный камень». Таким образом, ЩСР в ГПС-бетоне не приводят к появлению внутренних осмотических давлений, а способствуют лишь его частичной деструкции в объеме заполнителя.

4. Разработаны меры, подавляющие щелоче-силикатные взаимодействия

в системе «реакционноспособный заполнитель – цементный камень», в качестве которых предложено применение цементов с низким содержанием щелочей, а также пуццолановых добавок различной реакционной активности. Определены рекомендуемые способы защиты легкого бетона на основе гранулированного пеностекла марки «НеоПорм» против протекания ЩСР в зависимости от температурно-влажностного режима его эксплуатации. Разработаны составы ГПС-бетона, проранжированные по эффективности применения в зависимости от условий его эксплуатации, с учетом обеспечения сохранения его физико-механических и теплотехнических характеристик с течением времени. К рекомендуемым мерам, препятствующим протеканию ЩСР, относятся: применение цементов с содержанием щелочей (по Na_2O_e) не более 0,6%, добавка зол-уноса (до 30% по масс. цем.), замена цемента микрокремнеземом (до 10% по масс. цем.).

5. Впервые показано позитивное влияние пуццолановых добавок на процессы структурообразования в бетонах на пористых реакционноспособных заполнителях под действием щелоче-силикатных взаимодействий. Пуццолановые добавки вступают в химическое взаимодействие с портландитом и связывают его в низкоосновные гидросиликаты кальция на границе раздела фаз «пористый заполнитель – цементный камень», препятствуя тем самым доступу щелочей к заполнителю, что способствует: снижению относительных расширений до 65%, улучшению структурной целостности композита, увеличению прочности до 30%, сокращению образования щелоче-силикатных гидрогелей (по масс.) до 5%.

6. Предложены составы легкого бетона с применением гранулированного пеностекла с плотностью 400–800 кг/м³, прочностью 2,1–6,5 кгс/см², коэфф. теплопроводности в сухом состоянии 0,09–0,15 Вт/(м·К). Установлены зависимости основных физико-механических характеристик ГПС-бетона от его состава. Модернизирована технологическая схема производства изделий из ГПС-бетона с использованием мер, препятствующих протеканию ЩСР.

7. Экономическая эффективность разработанного бетона по сравнению с аналогами (до 6–11% по стоимости) обусловлена упрощением технологической схемы производства ГПС-бетона за счет отсутствия необходимости тепловлажностной обработки, а также возможностью перехода от трехслойной ограждающей конструкции к однослойной стене из ГПС-бетонных блоков благодаря улучшенным физико-механическим и теплотехническим свойствам материала. Апробация полученных результатов экспериментальных исследований осуществлялась на предприятии ОАО «Компания «СТЭС-Владимир». На базе предприятия была выпущена опытно-промышленная партия блоков из ГПС-бетона.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Полученная в ходе выполнения исследования методология может быть применена для разработки легких бетонов на пеностекольном щебне (отходе производства блочного пеностекла) как более дешевом заполнителе по сравнению с

ГПС. Также, в связи с увеличением пуццолановой активности при возрастании дисперсности ГПС актуальным является применение тонкомолотого ГПС в качестве меры, препятствующей протеканию ЦСР в ГСП-бетоне.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях из перечня ВАК

1. Попов, М.Ю. Легкие бетоны на основе пеностекла, модифицированные наноструктурами / **М.Ю. Попов**, С.Ю. Петрунин, В.Е. Ваганов, Л.В. Закревская // Нанотехнологии в строительстве (электронный журнал). – 2012. – № 6. С. 41 – 56.

2. Попов, М.Ю. Подбор составов легких бетонов на реакционноспособных пористых заполнителях / **М.Ю. Попов** // Научное обозрение. – 2015. – № 16. С. 162 – 167.

3. Попов, М.Ю. Щелоче-силикатная коррозия в легких бетонах на цементном вяжущем с пористым заполнителем на основе гранулированного пеностекла / **М.Ю. Попов**, Б.Г. Ким, В.Е. Ваганов, А.С. Брыков // Цемент и его применение. – 2015. – № 4. С. 89 – 93.

В зарубежных изданиях, индексируемых Scopus

4. Popov, M. Performance of Lightweight Concrete based on Granulated Foamglass / **М. Попов**, L. Zakrevskaya, V. Vaganov, S. Hempel, V. Mechtcherine // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2015. – № 96. 012001.

В сборниках трудов конференций

5. Попов, М.Ю. Новые легкие теплоизоляционные бетоны на основе пеностекла / **М.Ю. Попов**, Л.В. Закревская, В.Е. Ваганов // Сб. науч. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение», Днепропетровск, ПГАСА. – 2012. – № 64. С. 366 – 370.

6. Попов, М.Ю. Анализ и перспективы использования отходов стекольной промышленности в производстве теплоизоляционных материалов с улучшенными конструкционными свойствами / **М.Ю. Попов**, Б.Г. Ким, Л.В. Закревская, В.Е. Ваганов // Труды НГАСУ, Новосибирск, НГАСУ (Сиб-стрин). – 2012. – Т.15, № 2 (54). С. 128 – 133.

7. Попов, М.Ю. Исследование щелочной коррозии в легких бетонах на поризованных заполнителях на основе отходов стекольной промышленности / **М.Ю. Попов**, В.Е. Ваганов // Сб. науч. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение», Днепропетровск, ПГАСА. – 2013. – № 67. С. 255 – 260.

8. Popov, M. Research the reactivity of granulated foam glass to alkaline expansion in concrete / **М. Попов**, V. Vaganov // 6-th International Scientific Conference «Architecture, civil engineering – modernity», Varna, Bulgaria. – 2013. P. 278 – 284.

9. Решетняк, В.В. Моделирование щелочно-силикатных взаимодействий методами квантовой химии / В.В. Решетняк, **М.Ю. Попов**, С.Ю. Петрунин //

Тезисы докладов «VII Всероссийская конференция молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием по химии и наноматериалам», Санкт-Петербург. – 2013. С. 221 – 223.

10. Попов, М.Ю. Исследование долговечности легких бетонов с заполнителями на основе гранулированного пеностекла / **М.Ю. Попов**, В.Е. Ваганов, Л.В. Закревская, Б.Г. Ким // Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – взгляд в будущее», Москва, МГСУ – 2014. – В. 7, Т. 5. С. 324 – 336.

Подписано в печать 20.11.15.

Формат 60×84/16. Печ. л. 1,25. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.