

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ВЛАДИМИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
АЛЕКСАНДРА ГРИГОРЬЕВИЧА И НИКОЛАЯ ГРИГОРЬЕВИЧА
СТОЛЕТОВЫХ»
(ВлГУ)

На правах рукописи



Попов Максим Юрьевич

**ЛЕГКИЙ БЕТОН
НА ОСНОВЕ ГРАНУЛИРОВАННОГО ПЕНОСТЕКЛА**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ким Борис Григорьевич



Владимир – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	11
1.1 Легкие бетоны на пористых заполнителях.....	11
1.2 Разновидности пористых заполнителей для бетонов.....	13
1.3 Гранулированное пеностекло.....	16
1.4 Щелоче-силикатные взаимодействия в легких бетонах.....	17
1.5 Заключение по главе.....	22
2. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ	24
2.1 Используемые материалы.....	24
2.1.1 Портландцемент.....	24
2.1.2 Гранулированное пеностекло	27
2.1.3 Микрокремнезем.....	28
2.1.4 Зола-уноса.....	28
2.1.5 Пластификатор.....	29
2.1.6 Вода для приготовления бетона.....	30
2.2 Методы исследования.....	30
2.2.1 Методика определения прочностных свойств легкого бетона.....	31
2.2.2 Методика исследования потенциальной реакционной способности заполнителя к протеканию ЩСР.....	31
2.2.3 Ультразвуковое исследование	32
2.2.4 Микроскопические исследования и локальный химический анализ.....	34
2.2.5 Определение фазового состава материалов методом рентгеновской дифрактометрии.....	36
2.2.6 Определение пористости материалов методом ртутной порометрии.....	37

2.2.7	Определение химического состава твердых веществ методом рентгено-флуоресцентной спектроскопии.....	38
2.2.8	Определение химического состава растворов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой.....	39
2.2.9	Заключение по главе.....	40
3.	АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ГПС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ	41
3.1	Исследование химико-морфологических особенностей ГПС.....	41
3.2	Разработка методики исследования реакционной способности заполнителя к протеканию ЩСР	51
3.3	Исследование потенциальной реакционной способности заполнителя к взаимодействию со щелочами (испытание № 1 и № 2).....	54
3.4	Разработка состава ГПС-бетона	62
3.5	Испытания на расширение бетонных балочек (испытания №3 и №4)..	81
3.6	Микроструктурные исследования образцов после прохождения испытаний.....	89
3.7	Определение механизма протекания ЩСР в ГПС-бетонах.....	100
3.8	Заключение по главе.....	103
4.	РАЗРАБОТКА ПРЕВЕНТИВНЫХ МЕР ПРОТИВ ПРОТЕКАНИЯ ЩСР В ГПС-БЕТОНЕ	106
4.1	Выбор превентивных мер против протекания ЩСР в ГПС-бетоне....	106
4.2	Зависимость степени протекания ЩСР от содержания щелочей в ГПС-бетоне.....	107
4.3	Влияние действия пуццолановых добавок на протекание ЩСР в ГПС-бетоне	114
4.4	Микроструктурные исследования образцов после прохождения испытаний.....	127
4.5	Влияние протекания ЩСР на физико-механические и теплофизические свойства ГПС-бетона.....	134

4.6 Изучение механизма превентивного действия пуццолановых добавок в ГПС-бетонах.....	142
4.7 Разработка итоговых составов ГПС-бетона с учетом превентивных мер против протекания ЩСР.....	151
4.8 Заключение по главе.....	153
5. ВНЕДРЕНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	155
5.1 Технология производства ГПС-бетона и изделий на его основе	155
5.2 Экономическая эффективность применения ГПС для получения легких бетонов.....	158
5.3 Внедрение результатов исследований в промышленных условиях и учебном процессе.....	162
5.4 Заключение по главе.....	165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	166
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	169

ВВЕДЕНИЕ

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

Химический состав пеностекла отличается повышенным содержанием реакционного 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 пористыми заполнителями на основе гранулированного пеностекла (ГПС-бетона) с углубленным изучением проявления в нем ЩСР.

Работа выполнена при финансовой поддержке: Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках конкурса на получение стипендий Президента Российской Федерации для обучения за рубежом студентов и аспирантов российских вузов в 2013/2014 учебном году (приказ №585); ФГБУ «Фонда содействию развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», договор 656ГУ1 (2013 – 2015 гг.).

Степень разработанности:

Преимущества применения ГПС в качестве заполнителя для легких бетонов было рассмотрено в работах А.Н. Давидюка, С.М. Ивановой, А.А. Кетова и др.

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:

Разработка легких бетонов на пористых заполнителях 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 бетона;
- разработка методики определения проявления щелоче-силикатных реакций в ГПС-бетонах при различных условиях эксплуатации;
- разработка превентивных мер снижения негативных последствий щелоче-силикатных реакций в системе «активный заполнитель – цементный камень»;
- разработка составов и изучение свойств ГПС-бетона с учетом особенностей эксплуатации бетона в различных климатических условиях;
- подготовка нормативных документов для реализации теоретических и экспериментальных исследований. Промышленная апробация.

Научная новизна:

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 деструктивных процессов в теле реакционноспособного пористого заполнителя является применение превентивных мер, способствующих снижению доступа к заполнителю щелочей из цементной матрицы и внешней среды посредством снижения содержания щелочей в цементном камне и структурным преобразованиям в межфазной зоне «заполнитель - цементный камень».

Предложен механизм взаимодействия реакционноспособного пористого заполнителя со щелочами бетона, отличный от механизма протекания щелоче-силикатных взаимодействий в тяжелых и мелкозернистых бетонах и заключающийся в структурных преобразованиях кремнезема поверхностного слоя заполнителя в низкоосновные гидросиликаты кальция с образованием усадочных трещин стенок гранул по объему и накоплении солей кремниевой кислоты внутри пор заполнителя без образования продуктов реакции на границе раздела фаз «заполнитель – цементный камень». Таким образом, щелоче-силикатные реакции в бетоне на основе гранулированного пеностекла не приводят к появлению внутренних осмотических давлений, а способствуют лишь его частичной деструкции в объеме заполнителя.

Предложена методика оценки степени проявления щелоче-силикатных взаимодействий в легких бетонах при использовании реакционноспособных пористых заполнителей, заключающаяся в адаптации существующего метода ГОСТ 8269.0-97 и отличающаяся: применением отличных от стандартной методики химико-минералогических исследований; отличным фракционного состава заполнителя, в том числе при изготовлении испытуемых образцов; применением микроструктурных и физико-механических исследований образцов после испытания.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Разработаны превентивные меры, предотвращающие, либо подавляющие щелоче-силикатные реакции в системе «активный пористый заполнитель –

цементный камень».

Предложены составы легкого бетона с применением гранулированного пеностекла с плотностью 480–810 кг/м³, прочностью 2,1–6,5 МПа, теплопроводностью 0,09–0,15 Вт/(м·К). Установлены зависимости основных физико-механических характеристик изделий от вида ГПС и состава бетона.

Разработанные составы проранжированы по эффективности применения в зависимости от условий эксплуатации изделий, с учетом обеспечения сохранения физико-механических и теплотехнических характеристик ГПС-бетона 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;
- механизм взаимодействия реакционноспособного пористого заполнителя со щелочами бетона;
- механизм действия превентивных мер на процессы структурообразования в ГПС-бетонах под действием щелоче-силикатных реакций;
- методика оценки степени проявления щелоче-силикатных реакций в легких бетонах при использовании реакционноспособных пористых заполнителей;
- составы легкого бетона с применением гранулированного пеностекла;
- результаты апробации.

Степень достоверности и апробация результатов:

Достоверность полученных 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); XII и XIII международных научных конференциях «Стародубовские чтения» (Днепропетровск, 2012, 2013); всероссийской молодежной школе «Химия и технология полимерных и композиционных материалов» (Москва, 2012); 6-th International Scientific Conference «Architecture, civil engineering – modernity» (Варна, 2013); III Всероссийская (международная) конференция по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – взгляд в будущее» (Москва, 2014).

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 по направлению 270800 «Строительство» профиля «Промышленное и гражданское строительство» и «Городское строительство и хозяйство», магистров по направлению 270800 «Строительство».

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 двух статьях в российских рецензируемых научных журналах.

Структура диссертации:

Диссертация состоит из пяти глав, общих выводов, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 182 страницах машинописного текста, содержит 81 рисунок, 37 таблиц, библиографический список из 137 наименований.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Легкие бетоны на пористых заполнителях

В настоящее время в России и за рубежом наблюдается тенденция к применению энергоэффективных материалов. Подсчитано, что на отопление зданий и сооружений тратится около пятой части потребляемых энергоресурсов. Введенный СНиП II-3-79** «Строительная теплотехника» предусматривает существенное повышение теплоизоляционных свойств ограждающих конструкций. При этом обеспечение необходимых требований с использованием существующих строительных материалов является экономически нецелесообразным. 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 [1–7].

К таким материалам можно отнести легкие бетоны на пористых заполнителях. Преимущества легких бетонов были отражены в фундаментальных работах Ю.М. Баженова, Г.И. Горчакова, А.Г. Комара и др. [8–11]. Теоретические и практические исследования, охватывающие комплекс вопросов, связанных с изучением свойств легких бетонов на пористых заполнителях также проводились и другими авторами [12–15]. Применение легкого бетона возможно в виде монолитного материала, а также готовых изделий на его основе, например, ограждающих блоков [17–20].

Технология получения составов легких бетонов имеет некоторые принципиальные отличия от тяжелых и мелкозернистых бетонов. Большинство современных подходов к проектированию составов легких бетонов отрабатывались, в первую очередь, на примере керамзитбетонов. Технологические особенности подбора составов легких бетонов на пористых заполнителях были

рассмотрены в работах [21–24]. Подбор рецептуры бетона плотностью менее 800 кг/м³ зачастую проводится опытным путем. Наиболее применим для этого аппарат математической теории планирования эксперимента, актуальность использования которой выражена в перспективе значительного сокращения числа опытов при обеспечении требуемой сходимости результатов [25–28]. В настоящее время основные требования, предъявляемые к используемым материалам для получения легких бетонов на пористых заполнителях, а также технологии их получения представлены в ряде государственных стандартов [29–33].

Легкие бетоны делятся на три класса: низкой плотности (плотность в сухом состоянии составляет ниже 800 кг/м³), средней плотности (800 - 1400 кг/м³) и легкий конструкционный бетон (1400 - 2000 кг/м³). Традиционно, бетон является трехфазовым композиционным материалом, который состоит из цементной пасты, заполнителей, а также переходной зоны между заполнителем и цементным камнем. Как правило, наиболее слабый компонент легких бетонов – это пористые заполнители, которые составляют от 70 до 80 процентов от объема бетона. Применение легких бетонов зачастую ограничивается их высокой стоимостью, и из-за некорректного проектирования при использовании тех или иных видов заполнителей могут использоваться намного ниже предела своих возможностей. Также, строительно-технические характеристики и эксплуатационная стойкость бетона зависят от вида и свойств самого заполнителя. Структурные особенности легких бетонов на пористых заполнителях были рассмотрены в работах [34–39]. Зависимость прочности бетона от прочности применяемых заполнителей отмечалась как отечественными [40–44], так и иностранными специалистами [45–49].

Особое значение, влияющее на итоговые свойства легких бетонов на пористых заполнителях, в особенности на их прочность, играет прочность связи заполнителя и цементной матрицы. Как правило, прочность переходной зоны обеспечивается развитой пористой структурой и шероховатостью поверхности легкого заполнителя. Для некоторых типов заполнителей сцепление поверхности с

гранулой обуславливается не только адгезионными, но и химическими факторами в зоне контакта. Влияние переходной зоны на свойства бетона отмечалась как российскими учеными [50–52], так и многими иностранными коллегами [53–60]. Теплоизоляционные свойства легких бетонов в основном зависят от их плотности и влажности. Таким образом, оптимальными заполнителями для энергоэффективных бетонов являются материалы, обеспечивающие низкие плотность и водопоглощение композита при его относительно высокой прочности. К таким материалам можно отнести легкие заполнители высокой пористости, имеющие закрытые внутренние ячейки правильной формы [61–64].

Таким образом, в условиях ужесточения требований, предъявляемых к энергоэффективности зданий и сооружений, наблюдается повышение интереса к применению легких бетонов на пористых заполнителях в строительстве. Технология получения, физико-механические, теплофизические и структурные особенности легких бетонов имеют ряд отличий от тяжелых и мелкозернистых бетонов и изучались множеством специалистов как в России, так и за рубежом. Основные свойства легких бетонов в большей степени определяются качественными характеристиками используемых заполнителей.

1.2 Разновидности пористых заполнителей для бетонов

Основные физико-механические и теплоизоляционные свойства легкого бетона обусловлены его высокоразвитой пористой структурой, которую получают двумя способами: формированием структуры бетона с помощью пено- и газообразователей, и введением пористых заполнителей. Пористые заполнители применялись еще в античные времена около 3000 лет назад. В качестве заполнителей в них использовались вулканические материалы. Как правило, современные пористые заполнители представляют собой неорганические пористые материалы антропогенного происхождения, изготовленные с использованием

разнообразного сырья и производственных процессов. Свойства и характеристики легких заполнителей могут варьироваться в широких пределах.

Легкие бетоны на пористых заполнителях по сравнению с ячеистыми бетонами той же плотности обладают более высокими прочностными характеристиками, меньшей усадкой и ползучестью, что позволяет использовать их в широкой области применения [65–72]. Пористость таких бетонов регулируется как на уровне заполнителя, так и на уровне растворной составляющей, что благоприятно влияет на формирование микроклимата помещений.

На сегодняшний день один из наиболее применяемых пористых заполнителей для легких бетонов является керамзит. Последние достижения оптимизации технологического процесса производства керамзита позволяют получать керамзитовый гравий насыпной плотностью 300 – 600 кг/м³, на основе которого представляется возможным получать легкие бетоны плотностью 400 – 1000 кг/м³, прочностью 1,5 – 12 МПа при коэффициенте теплопроводности 0,1 – 0,2 Вт/м·С. Однако, несмотря на обилие разработок в этом направлении, реальные достижения в производстве керамзитового гравия и керамзитобетонов на протяжении многих лет выглядят несколько скромнее. Тем не менее, развитие технологии керамзитового гравия позволяет получать достаточно эффективные легкие бетоны для панелей и мелкоштучных изделий, и исследования в этом направлении не прекращаются [73–79].

Также, одним из перспективных пористых заполнителей является вспученный перлит, на котором возможно производство легких бетонов плотностью менее 700 кг/м³ при прочности до 3,5 МПа. Другим перспективным пористым материалом является вспученный вермикулит. Легкие бетоны на основе вспученного вермикулита обладают плотностью 450 – 900 кг/м³ [80–82]. Однако, широкое применение вспученных перлита и вермикулита ограничивается некоторыми технологическими факторами, такими как их высокая водопотребность, а также неудовлетворительное состояние сырьевой и производственной базы производства.

Также для получения легких бетонов могут применяться пенополистирол, арболит и другие заполнители, обладающие как рядом достоинств, так и недостатков. В настоящее время наибольшее распространение получили ячеистые бетоны: пенобетон, газобетон и газосиликат. В таблице 1.1 приведены некоторые свойства конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов. Как видно, легкие бетоны на пористых заполнителях, несмотря на меньшие объемы применения, могут иметь более высокие характеристики по сравнению с ячеистыми автоклавными бетонами.

Таблица 1.1 – Некоторые свойства конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов

Бетон	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·С
Керамзитбетон	400 – 1000	1,5 – 12,0	0,10 – 0,21
Перлитбетон	300 – 700	0,5 – 5,0	0,09 – 0,23
Арболит	500 – 600	1,5 – 3,5	0,10 – 0,12
Пенополистиролбетон	400 – 500	0,75 – 2,5	0,14 – 0,16
Ячеистый автоклавный	400 – 500	1,0 – 2,5	0,13 – 0,15

Таким образом, в современном строительстве существует актуальность поиска альтернативных материалов и технологий, направленных на возможность расширения существующей сырьевой базы и производства новых пористых заполнителей, позволяющих получать легкие бетоны средней плотностью 500 – 800 кг/м³.

1.3 Гранулированное пеностекло.

Стекло является одним из важнейших материалов народного хозяйства. Потребление стекла возрастает с каждым годом. Это ведет к увеличению объемов отходов стекольной промышленности. В последние десятилетия появилось множество исследований, направленных на оценку и изучение потенциала использования стеклобоя в бетонной индустрии [83–88]. Стеклобой и продукты его переработки могут быть включены в цементные композиты как крупные заполнители, так и в виде порошка для частичной замены вяжущего.

В последние десятилетия особое место занимают исследования в области производства пеностекла – продукта переработки пиропластическим методом отходов стекольной промышленности. Оно представляет собой материал, состоящий из замкнутых ячеек сферической и гексагональной формы и отличающийся высокой механической прочностью, долговечностью и высокой морозостойкостью при относительно невысокой средней насыпной плотности гравия. Первые вспученные материалы по стекольной технологии в производственных условиях были получены учеными И.И. Китайгородским и Ф. Шиллом. В последующие годы многие ученые работали над улучшением предложенной технологии [89–94].

Гранулированное пеностекло имеет ряд преимуществ перед блочным, главным из которых является более простая технология, включающая короткие печи вспенивания и отжига и позволяющая использовать в основном серийно выпускаемое оборудование после небольшой модернизации. Эта технология, как показал многолетний опыт, позволяет устойчиво работать практически без отходов, тогда как производство монолитно-блочного стекла дает значительны отхода за счет среза «горбушки» и повреждений при резке блоков на плиты.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что применяемое пеностекло с насыпной плотностью 150 - 350 кг/м³ в качестве заполнителя

позволяет получать конструкционно-теплоизоляционные бетоны средней плотности 500 - 900 кг/м³ [96–101]. При этом на 15 - 30 % сокращается материалоемкость и на 10% - себестоимость конструкций, до 80% увеличивается сопротивление теплопередаче конструкций за счет низкой плотности и теплопроводности.

Таким образом, среди всех пористых заполнителей можно отметить высокие физико-механические и теплотехнические свойства гранулированного пеностекла. Исследователями отмечается перспективность использования гранулированного пеностекла в легких бетонах. Стоит отметить, что ГПС изготавливается из неперерабатываемых отходов стекольной промышленности, поэтому широкое применение данного типа заполнителя в бетонах и расширение его рынка сбыта может значительно увеличить объемы переработки скапливаемых на свалках страны отходов стекольной промышленности и улучшить экологическую обстановку в регионе.

1.4 Щелоче-силикатные взаимодействия в легких бетонах

Так как в химическом составе пеностекла преобладают соединения оксида кремния, то при его применении в композитах на основе цемента существует опасность возникновения ЩСР. Данный вид коррозии впервые был обнаружен Т.Е. Стэнтоном в США в 40-х годах. В СССР проблемой протекания ЩСР в бетонах занимались Г.С. Рояк, В.М. Москвин, В.Н. Вернигородова, Н.К. Розенталь, Г.В. Любарская, А.С. Брыков и др. [102–106].

Проявление ЩСР заключается в том, что аморфный оксид кремния может вступать в реакцию с щелочами цемента. Как правило, щелочные соединения поступают в бетон из его компонентов (вяжущее, добавки, заполнители) или из внешних источников. Значение водородного показателя порового раствора бетона составляет в среднем около 12,5. Щелочная среда бетона способствует

расщеплению силановых связей кремнезема в заполнителе под действием гидроксид-ионов. Данный процесс деполимеризации приводит к разрыхлению структуры кремнезема заполнителя, в особенности на его поверхности, и внедрению в него щелочных ионов. С увеличением щелочности деполимеризованного кремнезема возрастает его способность сорбировать воду. При поглощении воды материал со временем приобретает структуру раствора, в котором присутствуют силикатные ионы различного полимерного состава. Образуется щелоче-силикатный гидрогель, состоящий из низкополимерных ионов кремниевых кислот и катионов натрия, калия и кальция. Содержание последнего обуславливает вязкость геля, его структуру и способность абсорбировать воду. С повышением содержания кальция повышается компактность структуры геля и снижается сорбционная способность. Поглощение воды ведет к повышению объема щелоче-силикатного гидрогеля, что в свою очередь способствует появлению внутренних осмотических давлений, ведущих к расширению бетонных конструкций и разрушающих структуру композита [107–110].

Как правило, данная проблема актуальна при применении реакционных заполнителей в плотных бетонах, в особенности в конструкциях, подверженных агрессивному воздействию окружающей среды. В порах легких реакционных заполнителей имеется достаточно свободного объема для размещения силикатного гидрогеля и разрушение бетонной конструкции возможно только после частичного или полного заполнения гелем порового пространства. Более того, количество образующихся продуктов реакции как правило ограничено, и весь объем геля может быть размещен в пористой структуре заполнителя [111–116]. Однако, в силу высокого содержания аморфного кремнезема в составе ГПС существует необходимость комплексного исследования проявления щелоче-силикатных реакций в ГПС-бетонах.

На данный момент в мире не существует международных согласованных требований для тестирования пористых заполнителей на проявление ЩСР. Среди прочих ускоренных испытаний образцов бетона стоит отметить методы, которые

рассчитаны на длительный период и наиболее приближены к реальным условиям эксплуатации бетонных сооружений. Поэтому они имеют большую достоверность в отношении заполнителей как с низкой, так и высокой активностью. К таким методам можно отнести годовое испытание бетонных призм в климатической камере при температуре 40°C и влажности 100%. Результаты, полученные этими методами, следует считать приоритетными, даже если они не совпадают с результатами испытаний по остальным ускоренным методам. Для анализа проявления ЩСР в уже возведенных конструкциях на практике в основном полагаются на визуальный осмотр, проводимый на регулярной основе. Для более качественной оценки проявления ЩСР в бетонных конструкциях применяются неразрушающие методы исследования, такие как метод измерения скорости ультразвукового импульса [117–121].

В ряде зарубежных работ был определен комплексный подход к различным применениям стеклобоя, включая производство плитки и кирпичей, стеновых панелей, изоляции на основе стекловолокна, заполнителей для дорожного строительства, заполнителей для бетона и вяжущих веществ. Отмечается высокая реакционная активность обычного стекла при его применении в бетонах [122–124]. При анализе реакционной способности вспененного пористого стекла некоторые авторы выделяют его способность размещать в объеме пор образованный в ходе ЩСР гель, что ведет к отсутствию расширений образцов или образованию кристаллических выделений на их поверхности. Испытанные согласно методикам по ASTM C 1293-01 образцы, показали расширения, не превышающее максимально допустимое значение в 0,1%, что говорит об отсутствии протекания щелочно-силикатных реакций. Другие авторы отмечают серьезное разрушение структуры заполнителя после ускоренного 14-дневного теста, делая вывод о негативных последствиях использования ГПС в бетонах [125–130]. Таким образом, в научном сообществе на данный момент нет однозначных представлений о применимости пеностекла в цементных системах.

Европейские стандарты, посвященные применению легких заполнителей в бетонах и растворах, в случае возможности возникновения ЩСР предписывают

использование превентивных мер, таких как использование цемента с низким содержанием щелочей, комбинирование реакционных заполнителей с нереакционными, а также применение специальных добавок-ингибиторов ЩСР. Хорошо известно, что природные пуццоланы, такие как микрокремнезем, метакраолин, зола-уноса и гранулированные доменные шлаки весьма эффективны против щелочной коррозии. Это обусловлено несколькими факторами. Во-первых, частичное замещение цемента минеральными добавками снижает количество щелочей, поступающих с цементом в бетон. Во-вторых, использование этих добавок способствует снижению пористости и созданию более плотной структуры камня, что существенно ограничивает поступление влаги внутрь бетона и затрудняет возможность распространения в нем щелоче-силикатного геля. В-третьих, обладая также высокой удельной поверхностью и высокой пуццоланической активностью, минеральные добавки значительно снижают подвижность щелочных катионов и их концентрацию в жидкой фазе бетонной смеси уже на начальных стадиях гидратации, до формирования структуры камня. Также, при их применении отмечается снижение щелочности поровой жидкости цементного камня.

Во многих странах, где при производстве цемента нет возможности использовать нереакционноспособные материалы, уже на протяжении десятков лет используются пуццолановые добавки, такие как микрокремнезем и золы-уноса [131–139]. Микрокремнезем является высокоэффективной пуццолановой добавкой, способствующей улучшению физико-механических свойств бетонов. Микрокремнезем представляет собой ультрадисперсный материал, получаемый при восстановлении высокочистого кварца углем в дуговых печах при изготовлении кремния и ферросилиция и состоит из очень мелких сферических частиц, содержащих аморфный диоксид кремния SiO_2 в количестве не менее 85 %. Микрокремнезем представляет собой гранулы сферической формы размером до 100 мкм (рисунок 1.1 «а»). Зола-уноса – это добавка для бетонов, которая частично обладает вяжущим и пуццоланическим действием и позволяет: экономить цемент и заполнители, повысить стойкость бетона к агрессивным средам, а также

улучшить удобоукладываемость смеси. Зола-унос представляет собой тонкодисперсный материал, частицы которого, как правило, имеют размер от десятых долей микрона до одного-двух десятых доли миллиметра. Зола-уноса получают электростатическим или механическим выделением пылевидных частиц из отходящих газов агрегатов, в которых сжигают тонкомолотый уголь. Зола-уноса по своей природе может быть кислой (богатой SiO_2), либо основной (богатой CaO). Первая проявляет пуццоланические свойства, вторая может дополнительно проявлять гидравлические свойства. Зола-уноса представляет собой тонкодисперсную пыль, состоящую в основном из сферических частиц с пуццоланическими свойствами (рисунок 1.1 «б»).

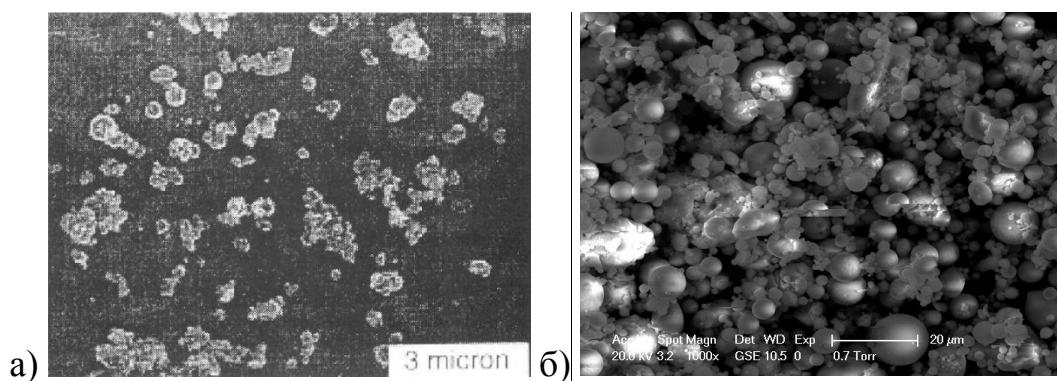


Рисунок 1.1 – Микрофотография (СЭМ) отдельных сферических частиц: а – микрокремнезема; б – золы-уноса.

Таким образом, 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 теплофизическими характеристиками, сохраняющих свои

свойства в течение всего срока эксплуатации без необратимых последствий протекания ЩСР в теле бетона.

Цель работы - разработка легких бетонов на пористых заполнителях 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 бетона; разработка методики определения проявления щелоче-силикатных реакций в ГПС-бетонах при различных условиях эксплуатации; разработка превентивных мер снижения негативных последствий щелоче-силикатных реакций в системе «активный заполнитель – цементный камень»; разработка составов и изучение свойств ГПС-бетона с учетом особенностей эксплуатации бетона в различных климатических условиях; подготовка нормативных документов для реализации теоретических и экспериментальных исследований.

1.5 Заключение по главе

1. В связи с ужесточением требований, предъявляемых к энергоэффективности зданий и сооружений, наблюдается повышение интереса к применению легких бетонов на пористых заполнителях в строительстве, основные свойства которых в большей степени определяются качественными характеристиками используемых заполнителей.

2. На данный момент для производства легких бетонов на пористых заполнителях применяются в основном: керамзит, вспученный перлит, пенополистирол, имеющие как достоинства, так и ряд недостатков. В современном строительстве существует актуальность поиска альтернативных материалов и

технологий, направленных на возможность расширения существующей сырьевой базы и производства новых пористых заполнителей

3. Среди всех пористых заполнителей можно отметить высокие физико-механические и теплотехнические свойства гранулированного пеностекла. Исследователями отмечается перспективность использования гранулированного пеностекла в легких бетонах.

4. 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.

2.2. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1 Используемые материалы

Качество используемых материалов напрямую влияет на свойства полученной бетонной смеси. В работе были использованы следующие материалы для изготовления ГПС-бетона:

- 1) Портландцемент;
- 2) Пористый заполнитель - гранулированное пеностекло фракции 0,16 – 5,0 мм;
- 3) Пуццолановая добавка - микрокремнезем конденсированный для бетонов;
- 4) Пуццолановая добавка - зола-унос тепловых электростанций для бетонов;
- 5) Пластифицирующая добавка - поликарбоксилатное ПАВ;
- 6) Вода для бетонов и растворов.

2.1.1 Портландцемент

В качестве вяжущего в работе использовался портландцемент фирмы ООО «Азия Цемент» двух типов: ЦЕМ I 42,5 Н и низкощелочной ЦЕМ I 42,5 Н НЩ ДП, с. Усть-Инза, Россия (рисунок 2.1 «а»).

Основные характеристики портландцементов представлены в таблице 2.1. Химические и минералогические составы использованных портландцементов представлен в таблицах 2.2 и 2.3, соответственно. Портландцемент по вещественному составу должен соответствовать требованиям ГОСТ 10178-85.

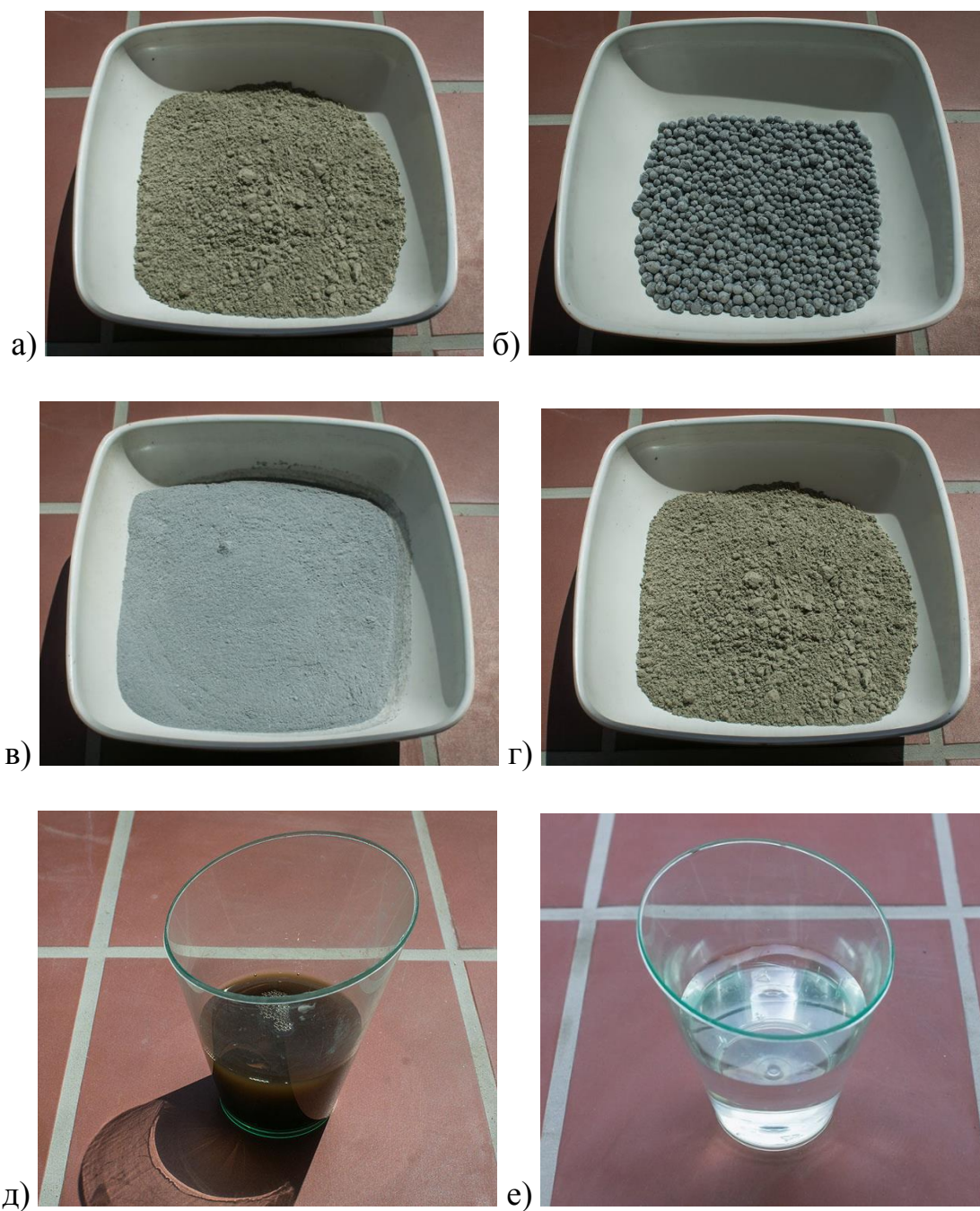


Рисунок 2.1 – Материалы, применяющиеся в работе: а – Портландцемент «ЦЕМ I 42,5 Н»; б – смесь гранул пеностекла фракционного размера 2,5 - 5 мм; в – микрокремнезем марки МКУ- 85; г – зола-унос Новотроицкой ТЭС; д – гиперпластификатор Glenium ACE30 фирмы BASF; е – вода для приготовления бетонной смеси.

**Таблица 2.1 – Краткая характеристика свойств использованных
портландцементов**

	ЦЕМ I 42,5 Н	ЦЕМ I 42,5 Н НЩ ДП
Удельная поверхность, см ² /г	3720	3660
Начало схватывания, мин	160	120
Водопотребность, %	29,1	28,3
Прочность на сжатие (3 суток), МПа	31,3	31,6
Прочность на сжатие (28 суток), МПа	58,8	66,5
Содержание щелочей (эквивалент Na ₂ O), %	0,48	0,86
Усадка (Ле-Шателье), мм	1,1	0,8

Таблица 2.2 – Химические составы использованных портландцементов

Название портландцемента	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	R ₂ O
ЦЕМ I 42,5 Н	63.38	18.66	6.31	3.31	3.03	3.01	0.89	0.28	0,86
ЦЕМ I 42,5 Н НЩ ДП	63.49	19.41	6.25	2.81	3.27	3.07	0.39	0.22	0,48

Таблица 2.3 – Минералогический состав использованных портландцементов

Название цемента	3 CaO·SiO ₂	2 CaO·SiO ₂	4 CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	3 CaO·Al ₂ O ₃
ЦЕМ I 42,5 Н	53,8	17,4	11,2	9,6
ЦЕМ I 42,5 Н НЩ ДП	57,3	19,5	12,3	7,2

2.1.2 Гранулированное пеностекло

В качестве заполнителя для легкого бетона в исследовании использовалось калиброванное гранулированное пеностекло марки «НеоПорм» фирмы ЗАО «Компания «СТЭС-Владимир», г. Владимир, Россия (рисунок 2.1 «б»). Пористый заполнитель удовлетворяет требованиям ГОСТ 9758-86 и ТУ 5914-001-00643867-94. Химический состав и основные характеристики гранулированного пеностекла представлены в таблицах 2.4 и 2.5 соответственно.

Таблица 2.4 – Химический состав гранулированного пеностекла марки «Неопорм» ЗАО «Компания «СТЭС – Владимир»

Оксид	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Другие
Масс, %	69,9	13,2	9,8	4,1	1,7	1,3

Таблица 2.5 – Основные характеристики гранулированного пеностекла марки «Неопорм» фирмы ЗАО «Компания «СТЭС – Владимир» в зависимости от фракционного размера гранул

	Фракционный состав, мм			
	0,160 - 0,63	0,63 - 1,25	1,25 - 2,5	2,5 – 5,0
Насыпная плотность, кг/м ³	200 - 400	180	150	130
Теплопроводность в насыпи, Вт/(м·К)	0,066-0,100	0,063	0,061	0,060
Прочность на сжатие, кгс/см ²	25-27	20-22	18-21	15-20
Коэффициент конструкционного качества, %	11-12	12-13	13-14	14-15

2.1.3 Микрокремнезем

В работе использовался микрокремнезем марки МКУ- 85, город Новокузнецк. (рисунок 2.1 «в»). Основные характеристики и химический состав микрокремнезема представлены в таблицах 2.6 и 2.7, соответственно. Микрокремнезем удовлетворяет требованиям ГОСТ 31108-2003, ТУ 5743-048-02495332-96.

Таблица 2.6 – Краткая характеристика свойств использованного микрокремнезема

Характеристика	Значение
Потери при прокаливании, %, макс.	0,8
Крупные частицы более 45 мкм, %, макс.	0,5
Значение водородного показателя	5,5 – 7,5
Насыпная плотность, кг/м ³	250 - 350

Таблица 2.7 – Химический состав микрокремнезема

Химический состав, %						
SiO ₂	C	CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃
97,33	0,98	0,45	0,37	0,18	0,13	0,06

2.1.4 Зола-уноса

В работе использовалась кремнистая зола-унос Новотроицкой ТЭС (рисунок 2.1 «г»). Химический состав и основные характеристики золы-уноса представлены в таблицах 2.8 и 2.9 соответственно. Зола-уноса удовлетворяет требованиям ГОСТ 25818-91.

Таблица 2.8 – Химический состав золы-уноса

Химический состав, %						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Прочее
51,63	26,69	7,43	4,91	4,32	1,24	8,10

Таблица 2.9 – Краткая характеристика свойств использованной золы-уноса

Характеристика	Значение
Потери при прокаливании, %, макс.	2,2
Крупные частицы более 45 мкм, %, макс.	29
Плотность частиц, кг/м ³	2350
Насыпная плотность, кг/м ³	1100
Водопотребность, %	27,8
Индекс активности, 28 сут., %	86
Индекс активности, 90 сут., %	102

2.1.5 Пластификатор

В работе применяется поликарбоксилатный гиперпластификатор марки Glenium ACE30 фирмы BASF, Германия (рисунок 2.1 «д»). Основные характеристики представленного пластификатора представлены в таблице 2.10. Пластификатор удовлетворяет требованиям ГОСТ 24211-91.

Таблица 2.10 – Краткая характеристика свойств использованного пластификатора

Характеристика	Значение
Внешний вид	Светло-коричневая жидкость
Относительная плотность, кг/м ³	1050 при 25°С
Водородный показатель	6
Содержание хлорид-ионов, %, не более	0,2
Содержание щелочных ионов, %, не более	0,1

2.1.6 Вода для приготовления бетона

В работе применялась водопроводно-питьевая вода, водородный показатель которой составлял не менее 4 и не более 12,5 (рисунок 2.1 «ж»). Ориентировочное содержание органических примесей в воде не превышало 20 мг/л. Вода удовлетворяет требованиям ГОСТ 23732-79.

2.2 Методы исследований

Легкий бетон с заполнителями на основе гранулированного пеностекла является композиционным материалом, для исследования которого необходим комплексный подход методов анализа как физико-механических, теплотехнических и эксплуатационных характеристик самого композита, так и микроструктурных, физических, минералогических и фазово-химических свойств отдельных его составляющих. Контроль основных технологических процессов при разработке ГПС-бетонов осуществлялся согласно предусмотренными ГОСТами методами. Нормальная густота и сроки схватывания цементной пасты, ее плотность и расплыв цилиндра – по ГОСТ 310.3 и ГОСТ 23789, плотность,

прочность, размер фракции и реакционная способность ГПС – по ГОСТ 9758 и ГОСТ 8269.0, плотность, прочность при сжатии и изгибе, влажность по объему – ГОСТ 10180 и ГОСТ 12730, теплопроводность – по ГОСТ 7076, паропроницаемость, сорбционное увлажнение, морозостойкость – по ГОСТ 12852, внешний вид и геометрический размер блоков из ГПС-бетона – по – ГОСТ 13015, 26433.0, 26433.1. Также, наряду с общепринятыми методами в диссертационной работе использовали также методы микроструктурного и физико-химического анализа: сканирующую электронную микроскопию с применением энерго-дисперсионного спектрального анализа, ртутную порозиметрию, рентгенофазовую, рентген-флюоресцентную и эмиссионную спектроскопию.

2.2.1 Методика определения прочностных свойств легкого бетона.

Прочностные показатели бетона определялись по ГОСТ 10180-90 «Бетоны методы определения прочности по контрольным образцам». Для определения предела прочности при сжатии изготавливались кубы с размером ребра 10 см. Максимальный размер фракции ГПС при изготовлении образцов составлял не более 5-7 мм.

2.2.2 Методика исследования потенциальной реакционной способности заполнителя к протеканию ЩСР

Реакционная способность ГПС к протеканию щелоче-силикатной коррозии исследовалась с помощью ряда экспериментов на основе методик, описанных в ГОСТ 8269.0-87* (рисунок 2.3). Комплекс методик состоял из серии последовательных испытаний гранул заполнителя и образцов ГПС-бетона. Согласно ГОСТ 8269.0-87*, на первом этапе исследования ГПС испытывается по ускоренному химическому методу. Гранулы заполнителя выдерживаются в

одномолярном растворе (1М) гидроксида натрия при температуре 80 градусов по Цельсию (°C) в течение 24 часов. Заполнитель считается потенциально реакционноспособным, если по окончании испытания концентрация ионов кремния в растворе составит более 50 ммоль/л. В таком случае, на следующем этапе исследования образцы бетона испытываются по ускоренной методике на расширение бетонных балочек. Образцы выдерживаются в одномолярном растворе гидроксида натрия при температуре 80 °C в течение 14 суток. Заполнитель считается потенциально реакционноспособным, если по окончании испытания относительные расширения образцов составят более 0,1%. В этом случае, проводят окончательное долгосрочное испытание бетонных призм. Образцы выдерживаются в климатической камере при температуре 40 °C и относительной влажности 100% в течение 12 месяцев. Заполнитель считается потенциально реакционноспособным, если по окончании испытания относительные расширения образцов составят более 0,04%. Более подробно представленные методики описаны далее в работе.

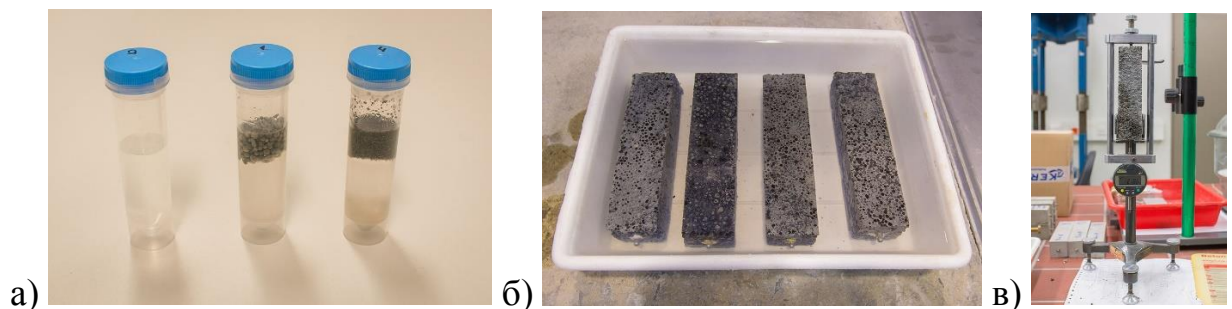


Рисунок 2.3 – а – Испытание ГПС химическим методом; б – Испытание ГПС методом расширяющихся балочек; в – дилатометр для определения относительных расширений образцов.

2.2.3 Ультразвуковое исследование

Ультразвуковое исследование ГПС-бетона проводилось на оборудовании Ultraschall-Messsystem CEL plus, согласно «ГОСТ 17624-87. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности» (рисунок 2.4). Принцип определения прочности и времени схватывания бетона ультразвуковым методом

основан на наличии функциональной связи между скоростью распространения ультразвуковых колебаний, проходящих через образец, и прочностью композита.

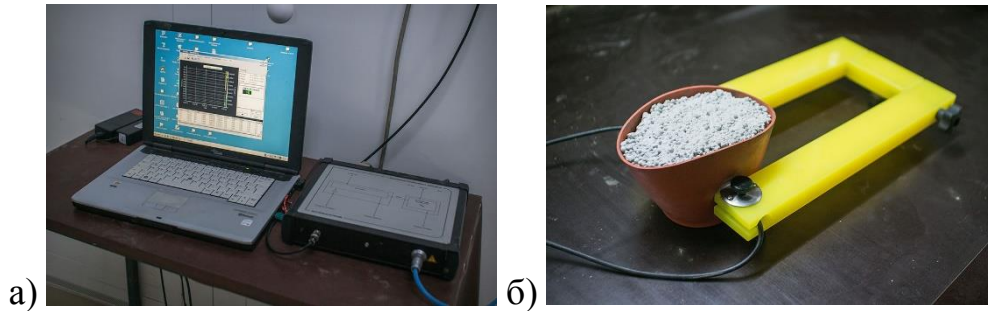


Рисунок 2.4 – Ультразвуковое исследование ГПС-бетона.

2.2.4 Микроскопические исследования и локальный химический анализ

В работе использовался растровый электронный микроскоп XL 30 ESEM фирмы Philips FEI с аналитической приставкой энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии EDX-System quantax 400 фирмы Bruker, рисунок 2.5 «а». Метод растровой электронной микроскопии основан на зондировании поверхности изучаемого образца тонко сфокусированным пучком электронов – так называемым зондом. При взаимодействии электронов зонда с веществом возникают ответные сигналы различной физической природы (отраженные и вторичные электроны, Оже-электроны, рентгеновское излучение, свет, поглощенный ток и пр.), которые используются для синхронного построения изображения на экране монитора. На рис. 2.10 «б» представлена схема образования вторичных сигналов под влиянием электронного зонда. Для формирования изображения используется электронно-оптическая система. Изменение масштабов изображения осуществляется радиотехническими средствами.

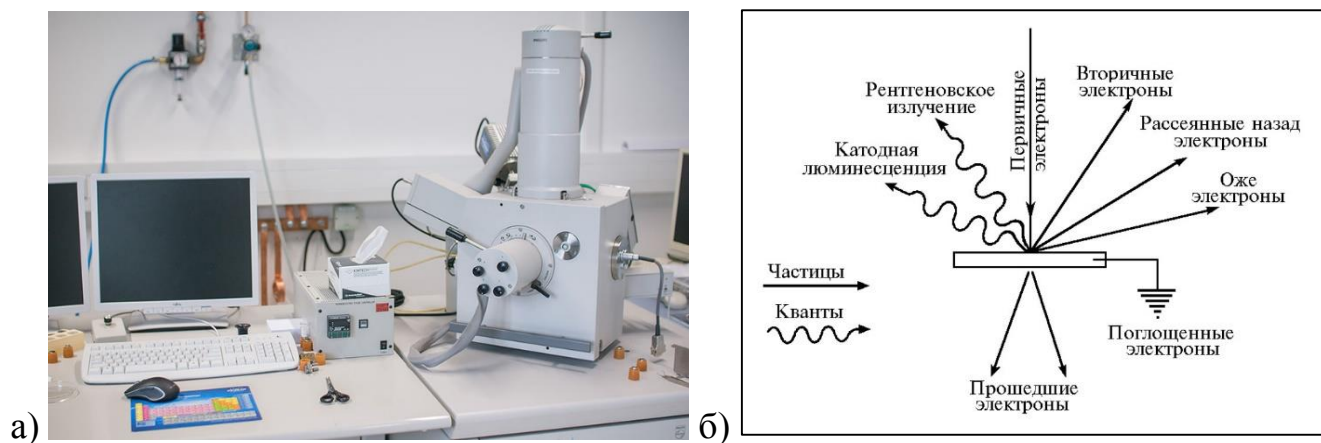


Рисунок 2.5 – а – Растровый электронный микроскоп микроскоп XL 30 ESEM (Philips FEI); б – Схема образования вторичных сигналов при взаимодействии электронов зонда с веществом мишени.

Энергодисперсионный рентгеноспектральный микроанализ основан на способности твердого тела испускать рентгеновское излучение под воздействием пучка электронов высокой энергии 1-50 кэВ (рисунок 2.6). На фоне непрерывного излучения связанного с торможением электронов ядрами атомов (тормозного излучения) появляются резкие пики – характеристическое рентгеновское излучение. Каждая линия возникает при взаимодействии электрона с определенным атомом. При определении длины волны излучения представляется возможным определить присутствующие в мишени элементы. Область характеристического рентгеновского излучения находится под поверхностью на глубине составляющих десятки мкм.

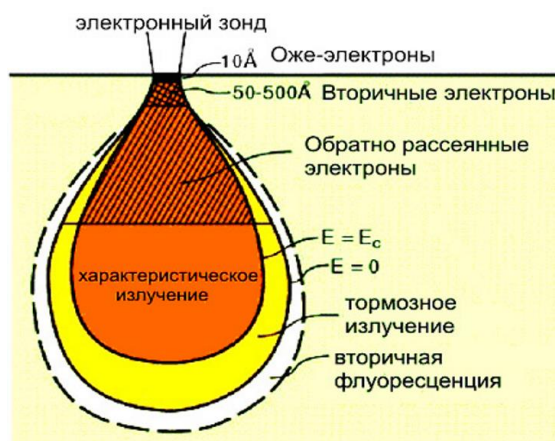


Рисунок 2.6 – Области генерации сигналов.

Количественный рентгеноспектральный микроанализ — это относительный метод, основанный на сравнении измеренной интенсивности рентгеновских линий, генерируемых в образце с интенсивностями соответствующих линий в надлежащем стандартном образце известного состава, при известных токах зонда и идентичных прочих аналитических условиях. Содержание элемента рассчитывается из отношения интенсивностей на образце и стандарте с известной концентрацией определяемого элемента в последнем. Методами рентгеноспектрального анализа можно определять концентрацию практически любых элементов от бериллия или бора до калифорния в диапазоне концентраций от сотых (ВДС) или десятых (ЭДС) долей весового процента до 100 %.

2.2.5 Определение фазового состава материалов методом рентгеновской дифрактометрии

В работе использовался рентгеновский дифрактомер XRD 3003 ТТ фирмы Seifert, рисунок 2.7 «а». В основе данного метода лежит явление дифракции рентгеновских лучей на трехмерной кристаллической решетке. Кристаллическая решетка - это регулярное трехмерное распределение атомов в пространстве, имеющее различную симметрию. Кристаллическая решетка в заданном направлении может рассматриваться как серия параллельных плоскостей, отстоящих друг от друга на некотором межплоскостном расстоянии. Любое кристаллическое вещество характеризуется определенным набором межплоскостных расстояний с различными ориентациями плоскостей. Когда монохроматизированный рентгеновский луч с определенной длиной волны падает на систему кристаллических плоскостей под определенным углом, при условии, что пути проходимые лучами, отраженными от различных кристаллических плоскостей, различаются на целое число длин волн, возникает дифракция. Это явление описано законом Брэгга. При изменении угла падения рентгеновского

луча, условия закона Брэгга удовлетворяются поочередно для различных систем плоскостей в поликристаллическом материале, в результате чего, на дифрактограмме исследуемого вещества последовательно, с изменением угла, появляются рентгеновские рефлексы - пики (линии дифрактограммы) с явным максимумом. Координаты и высота пиков характеризуют исследуемое вещество. Эти данные передаются в программное обеспечение, где обрабатываются в зависимости от вида исследований. Принципиальная схема дифрактометра показана на рисунке 2.7 «б».

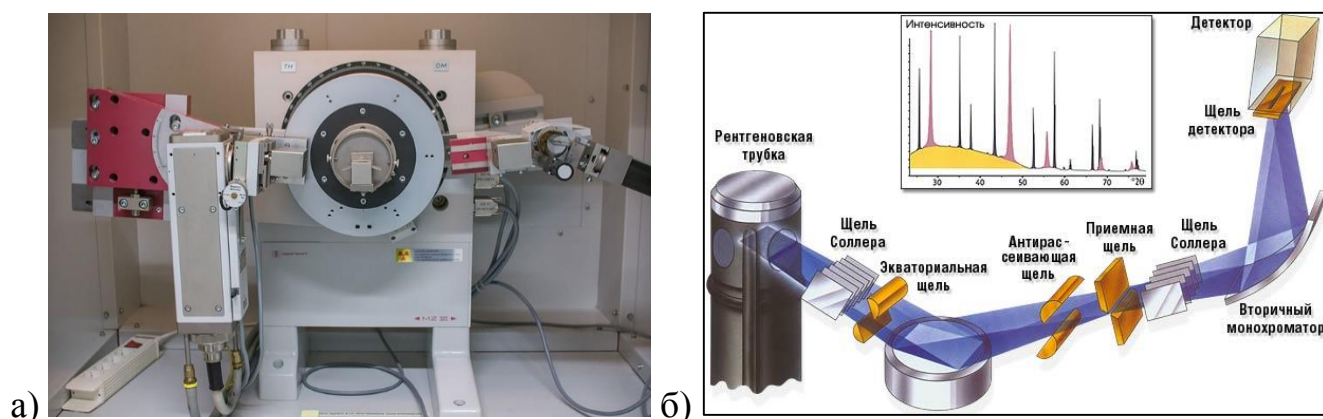


Рисунок 2.7 – а – Рентгеновский дифрактомер XRD 3003 ТТ (Seifert); б – принципиальная схема устройства дифрактометра.

2.2.6 Определение пористости материалов методом ртутной порометрии

В работе использовался порозиметер Pascal 140 фирмы Thermo Electron Company (рисунок 2.8), который предназначен для измерения пористости макро- и ультрамакроскопических материалов и порошков в диапазоне пор от 0,01 до 150 мкм.

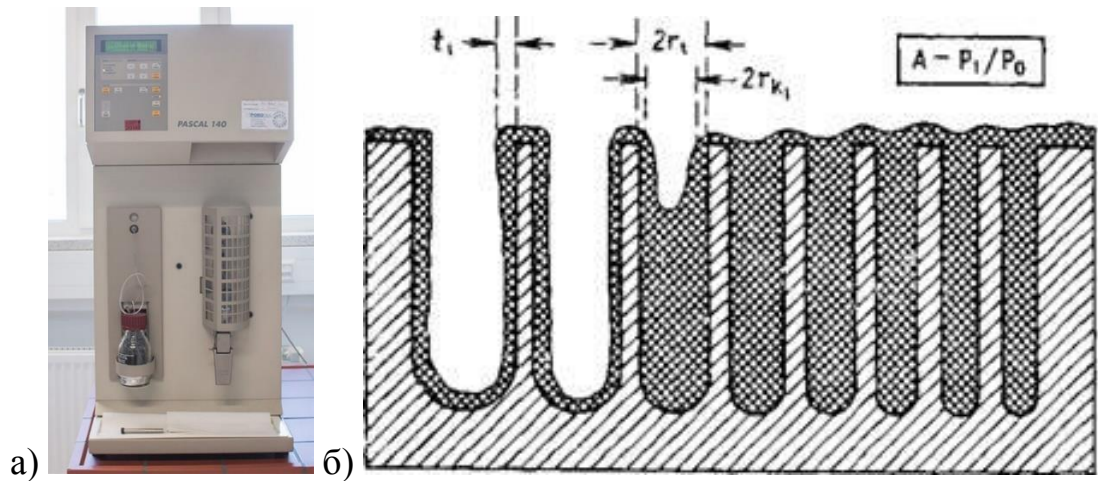


Рисунок 2.8 – а – Порозиметер Pascal 140; б – принципиальная схема определения объема пор по радиусам на основе данных ртутной порозиметрии.

Порометрия используется для определения минимального диаметра пор, максимального размера пор, среднего диаметра пор и распределения пор по размерам. Метод ртутной порометрии основан на проникновении несмачивающей твердое тело жидкости в его поры при воздействии внешнего давления. Объем жидкости, заполняющей поры, является функцией внешнего давления, что и позволяет получить информацию о распределении пор по размерам. Уравнение 2.1 является исходным для расчета кривой распределения объема пор по радиусам на основе данных ртутной порозиметрии:

$$Pr = -2 \gamma \cdot \cos(\theta) / P \quad (2.1)$$

где Pr – радиус пор; γ – поверхностное натяжение ртути; θ – краевой угол смачивания ртути; P – давление при проникновении.

2.2.7 Определение химического состава твердых веществ методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии

В работе использовался рентгенофлуоресцентный спектрометр «ARL ADVANT'X» (рисунок 2.9). Принцип действия рентгеновского спектрометра основан на облучении образца первичным излучением рентгеновской трубки. При облучении атомы образца переходят в возбуждённое состояние, заключающееся в переходе электронов на более высокие энергетические уровни. В возбуждённом состоянии атомы пребывает крайне малое время, порядка одной микросекунды, после чего возвращается в спокойное положение (основное состояние). При этом электроны с внешних оболочек либо заполняют образовавшиеся вакантные места, а излишек энергии испускается в виде фотона, либо энергия передается другому электрону из внешних оболочек (оже-электрон). При этом каждый атом испускает фотоэлектрон с энергией строго определённого значения. Для измерения количества элемента регистрируется интенсивность излучения с определённой энергией. Измеряется интенсивность вторичного флуоресцентного излучения от образца на длинах волн, соответствующих определяемым элементам, и далее рассчитываются массовые доли этих элементов по предварительно построенной градуировочной характеристике, представляющей собой зависимость содержания определяемого элемента от измеренной интенсивности.

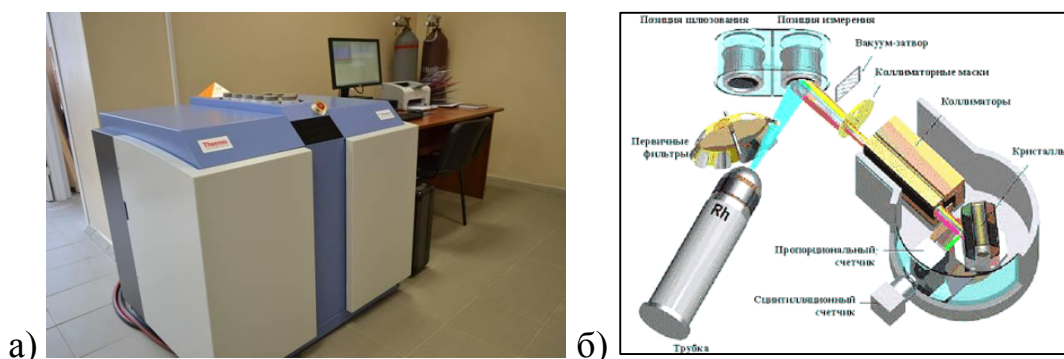


Рисунок 2.9 – а – Рентгенофлуоресцентный спектрометр ARL ADVANT'X; б – принципиальная схема устройства рентгенофлуоресцентного спектрометра.

2.2.8 Определение химического состава растворов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой

В работе использовался атомно-эмиссионный спектроскоп с индуктивно-связанной плазмой Optima 7000 DV фирмы, Perkin Elmer, США (рисунок 2.10). Метод основан на измерении интенсивности излучения света, испускаемого на определенных длинах волн атомами, возбужденными индуктивно-связанной аргоновой плазмой, и используется для определения концентраций исследуемых элементов. Количественная информация (концентрация) связана с количеством электромагнитного излучения, которое испускается, тогда как качественная информация (какие элементы присутствуют) связана с длиной волны испускаемого излучения. В атомной эмиссионной спектрометрии образец подвергается действию высоких температур, достаточных не только для диссоциации на атомы, но и для реализации значительного числа столкновений, вызывающих возбуждение (и ионизацию) атомов пробы. Атомы и ионы в состоянии возбуждения могут путем термических и радиационных (эмиссионных) передач энергии переходить в состояния с меньшей энергией. Образец переносится в прибор в виде потока жидкой пробы. Внутри прибора жидкость в ходе процесса, называемого распылением, переводится в аэрозоль и переносится в плазму, где десольватируется, испаряется, атомизируется и возбуждается и/или ионизируется плазмой. Возбужденные атомы и ионы испускают характеристическое излучение, которое собирается устройством, сортирующим излучение по длинам волн. Излучение детектируется и преобразуется в электронные сигналы, которые для анализа преобразуются в информацию по концентрациям.



Рисунок 2.10 – Атомно-эмиссионный спектроскоп Optima 7000 DV.

2.3 Заключение по главе

1. Для разработки легких бетонов использовались цемент с различным содержанием щелочей, зола-унос, микрокремнезем, пластификатор, вода, а также пористый заполнитель – гранулированное пеностекло, отвечающие основным требованиям, предъявляемым к строительным материалам.

2. Исследования проводились с использованием как комплекса общепринятых физико-механических испытаний, так и современных методов научных исследований: сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, рентгеновской дифрактометрии, ртутной порометрии, рентгено-флуоресцентной спектроскопии, атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой.

3. Описан комплекс методик на определение реакционной способности ГПС к протеканию щелоче-силикатной коррозии в ГПС-бетоне.

3. АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ГПС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ

3.1 Исследование химико-морфологических особенностей ГПС

Гранулированное пеностекло (ГПС) представляет собой сферические гранулы, имеющие высокопористую внутреннюю структуру. На рисунке 3.1 показан внешний вид гранул пеностекла диаметром 5 мм. ГПС может использоваться в качестве легкого заполнителя в бетонах. По сравнению с другими пористыми заполнителями, такими как пенополистирол, керамзит, перлит, вермикулит и другие, ГПС имеет высокие физико-механические и теплотехнические характеристики. Структура и химический состав ГПС обусловлены сырьевыми материалами и технологическими параметрами при его производстве, а именно температурным режимом и временем обжига стекольной шихты. В работе использовалось калиброванное гранулированное стекло марки «Неопорм» фирмы «ЗАО «Компания СТЭС-Владимир», свойства которого имеют высокую сходимость между производственными партиями и представлены в Главе 2. Как было указано выше, химический состав ГПС характеризуется высоким содержанием потенциально реакционноспособного кремнезема, что вызывает опасения возможности протекания негazitвных химических взаимодействий между заполнителем и щелочами бетона и использовании ГПС в цементных композитах на основе портландцемента и других высокощелочных вяжущих.



Рисунок 3.1 – Внешний вид гранул пеностекла фракции 4-6 мм.

На начальном этапе исследования применимости ГПС для использования в бетонах проводились микроструктурные исследования заполнителя. Была изучена микроструктура поверхности цельной гранулы пеностекла (рисунок 3.2 «а», «б» и «в»). Как видно, ГПС имеет развитую шероховатую поверхность, на которой наблюдается также некоторое количество открытых внешних пор. С одной стороны, это может способствовать лучшей адгезии заполнителя к цементному камню и высокой прочности композита в целом. С другой стороны, при большей удельной площади взаимодействия кремнезема ГПС с щелочами цемента возрастает опасность протекания ЩСР. Локальный химический анализ проводился при помощи энергодисперсионное сканирование поверхности гранулы (рисунок 3.3). Как видно, основные химические элементы, такие как кальций, кремний, магний, натрий, калий и др. имеют равномерное распределение на поверхности гранулы. В том числе, согласно проведенным исследованиям, наблюдается равномерное распределение щелочных элементов натрия и калия, содержание которых составляет около 6% и 0,3%, масс. соответственно. Белый налет на поверхности гранулы (рисунок 3.2 «б») характеризуется повышенным содержанием алюминия (таблица 3.1), и соответствует каолину ($Al_2O_3 \cdot 2 \cdot SiO_2 \cdot 2 \cdot H_2O$), который применяется при гранулировании массы пеностекла и в большом количестве остается на поверхности гранул.

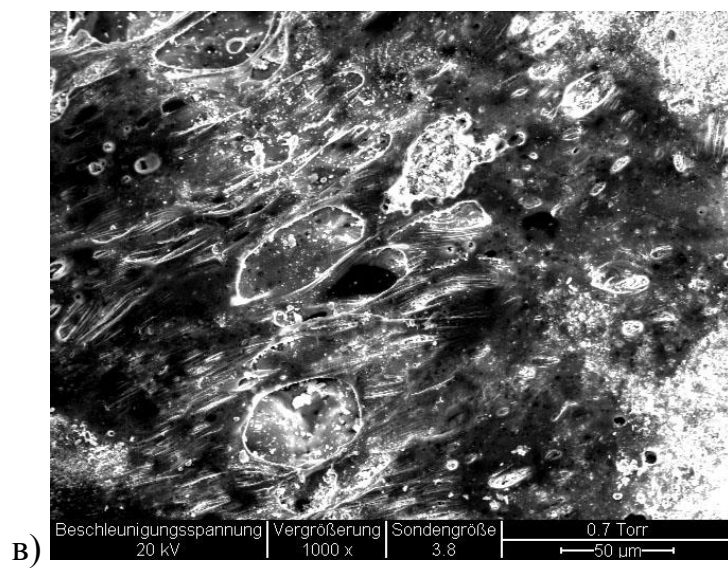
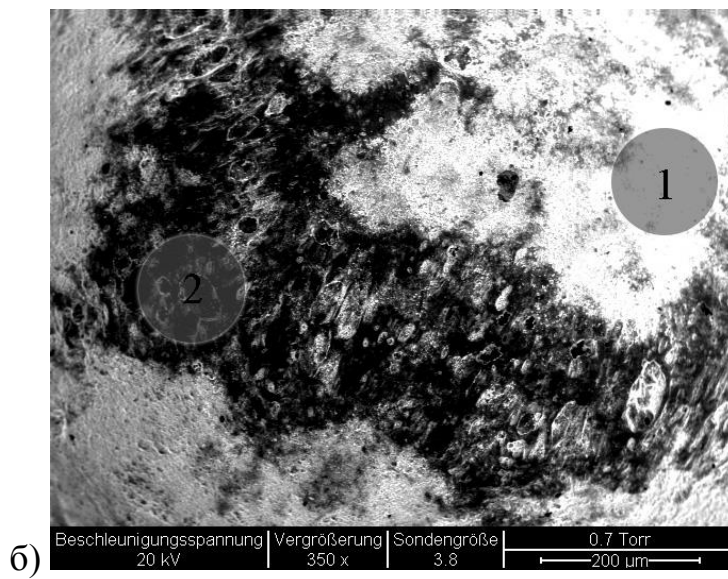
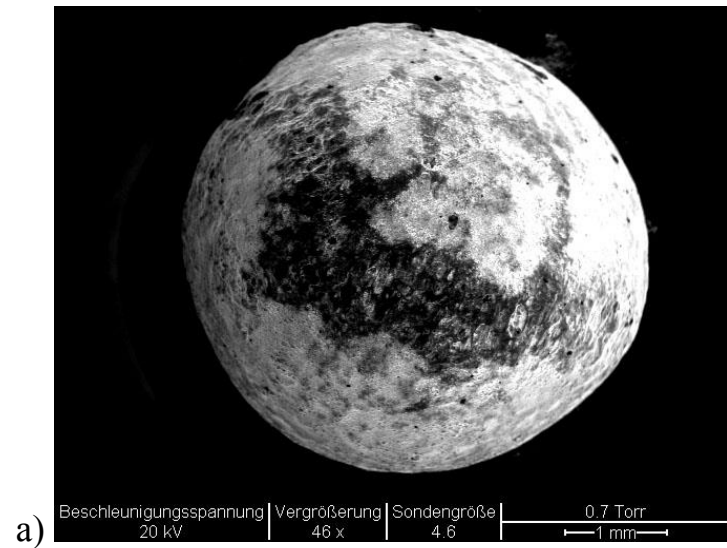


Рисунок 3.2 – Микроскопия поверхности гранулы пеностекла фракционного размера 5 мм.

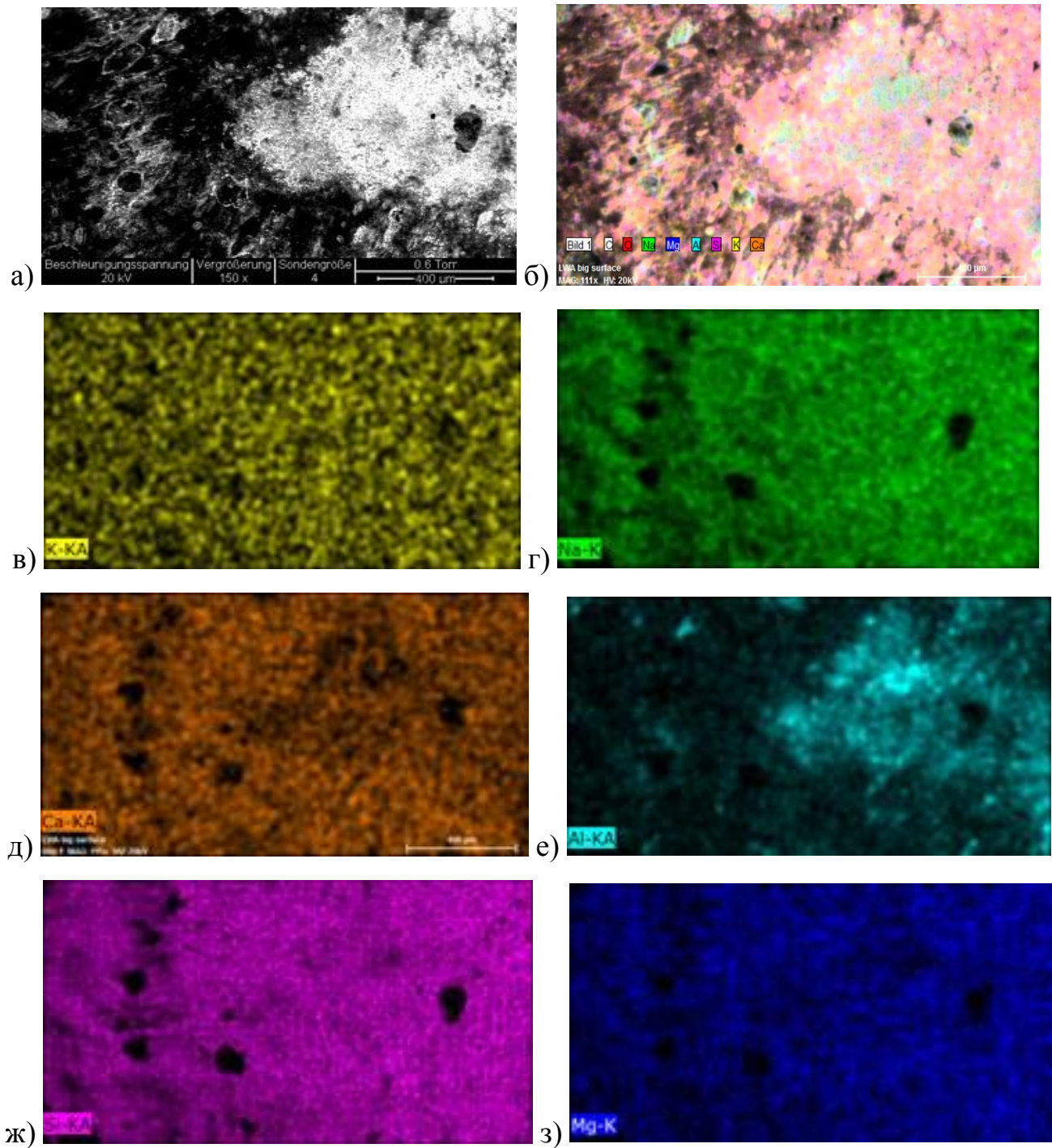


Рисунок 3.3 – Энергодисперсионное сканирование поверхности гранулы: а – микроскопия без сканирования; б – общее сканирование; в – распред. К; г – распред. Na; д – распред. Ca; е – распред. Al; ж – распред. Si; з – распред. Mg.

Таблица 3.1 – Локальный энергодисперсионный элементный химический анализ

№ спектра	Источник	Содержание элемента, %.								
		C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca
1	Рис. 3.2 «б»	2,29	53,31	6,07	1,03	7,65	25,19	-	0,33	4,14
2	Рис. 3.2 «б»	6,11	50,63	6,57	1,57	2,58	26,36	0,14	0,31	5,74

Так же, как и поверхность гранулы, ее внутренняя структура заполнителя играет большую роль на формирование физико-механических и теплофизических свойств бетона на его основе. На рисунке 3.4 «а»-«в» представлена микроскопия среза гранулы диаметром 5 мм. ГПС имеет высокоразвитую пористую внутреннюю структуру, которая состоит из множества ячеек округлой формы. Как видно, размеры внутренних пор намного превышают размеры пор, расположенных у стенок гранулы. Согласно результатам энергодисперсионного элементного химического анализа, внутренняя и внешняя области гранулы имеют схожий химический состав. Внешняя область гранулы, по сравнению с ее центром, содержит на 16% больше алюминия и на 29% меньше кальция (таблица 3.2). На рисунке 3.5 «г» - «е» показана микроскопия гранулы пеностекла фракционного размера 0,55 мм. Как видно, данная фракция ГПС имеет большее количество дефектов поровой структуры по сравнению с гранулой крупной фракции. Данные дефекты объясняют снижение коэффициента конструктивного качества (отношение предела прочности при сжатии к относительной плотности материала) мелкой фракции на 4% по сравнению с крупной фракцией ГПС 2,5 – 5 мм.

На микрофотографиях видно, что ячейки структуры преимущественно округлой формы, разделяемые между собой тонкой перегородкой, включающей более мелкие замкнутые поры. Размеры пор для ГПС насыпной плотности 250 кг/м³ и соотношение их составляют: 0,05 - 0,15 мм - до 25 - 30%; 0,15 - 0,35 мм - до 45 - 50%; 0,40 - 0,65 мм - до 20 - 25%. Толщина перегородок между ячейками составляет от 0,05 до 0,2 мм. Перегородки состоят

преимущественно из ячеек размером от 0,015 до 0,05 мм (5 — 10%). Также видно, что гранулы имеют гладкую остеклованную поверхность с равномерным распределением округлых пор. Необходимо отметить, что большое содержание стеклофазы и равномерное распределение мелких пор правильной формы определяют повышенную прочность и пониженную теплопроводность заполнителя, по сравнению с традиционными обжиговыми заполнителями, например, керамзитом.

Стоит отметить, что в межпоровых стенках гранулы расположено множество мелких каналов и капиллярных пор, соединяющих соседние ячейки, причем в центральной зоне гранулы (рисунок 3.5 «в»), по сравнению с ее краевой зоной (рисунок 3.5 «б»), наблюдается большее количество данных образований. С понижением средней плотности зерен на поверхности увеличивается количество и размеры открытых пор, приводящих к повышению водопоглощения заполнителя, которое в свою очередь обуславливает повышенную водопотребность бетонной смеси. Связи между ячейками могут негативно сказываться на увеличении водопоглощения цементных композитов на основе ГПС, что в итоге приведет к снижению теплосоппротивления и долговечности бетона.

Таблица 3.2 – Локальный энергодисперсионный элементный химический анализ

№ спектра	Источники	Содержание элемента, %.								
		C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca
3	Рис. 5б	2,51	48,23	7,90	1,69	4,26	28,82	-	0,30	5,74
4	Рис. 5в	5,20	47,76	8,58	1,89	0,69	28,14	0,09	0,28	7,41

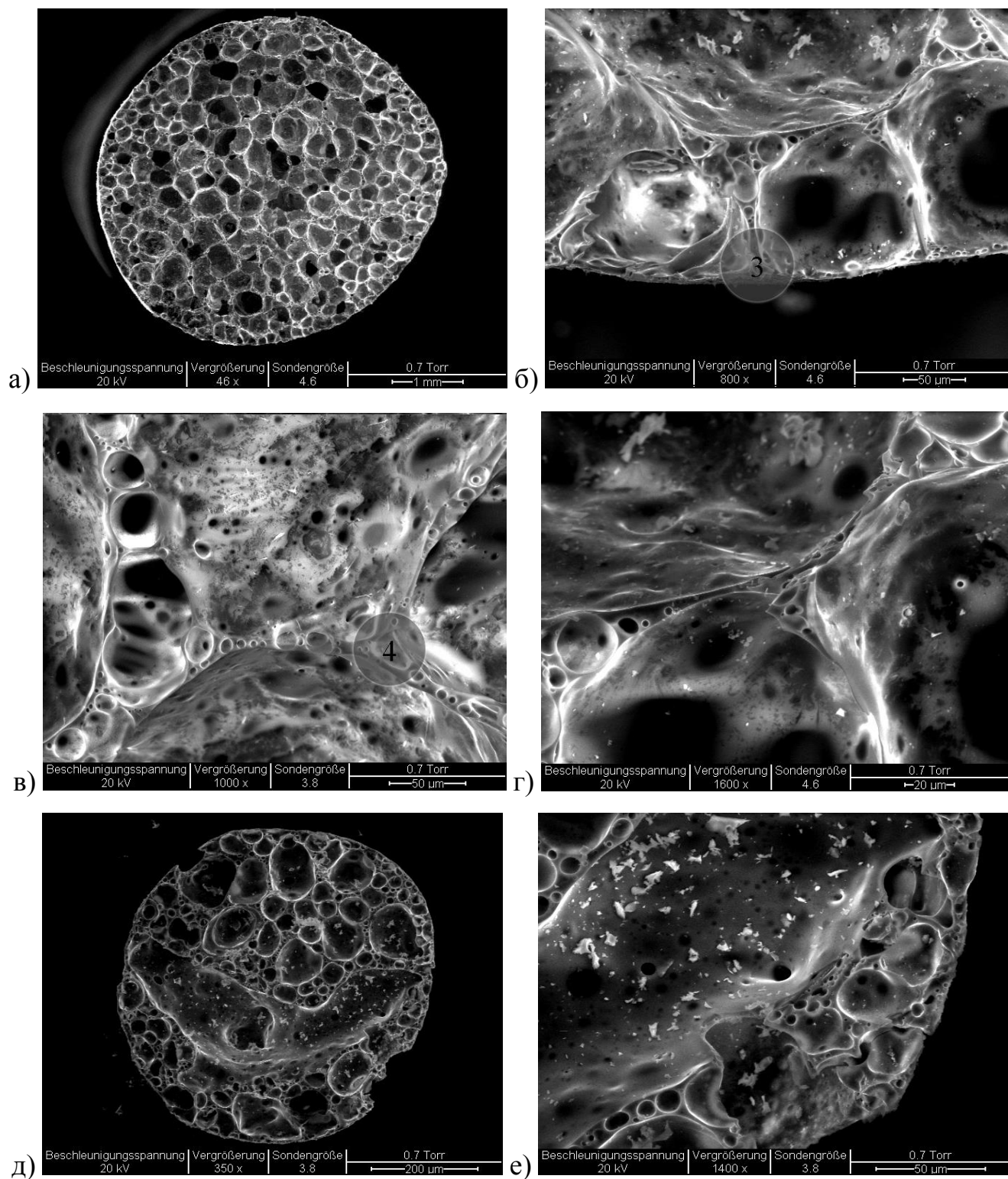


Рисунок 3.5 – Микроскопия среза: а, б, в – гранула размером 5 мм, г, д, е – гранула размером 0,55 мм.

Для проверки водопоглощения, гранулы фракционного размера 2,5 – 5 мм были помещены в стеклянный сосуд с дистиллированной водой, прижаты сетчатым

пригрузом, закрыты крышкой и выдержаны в течение 1, 7 и 28 суток (рисунок 3.6). Водопоглощения заполнителя по объему составили 5,15, 5,85 и 5,9%, соответственно.

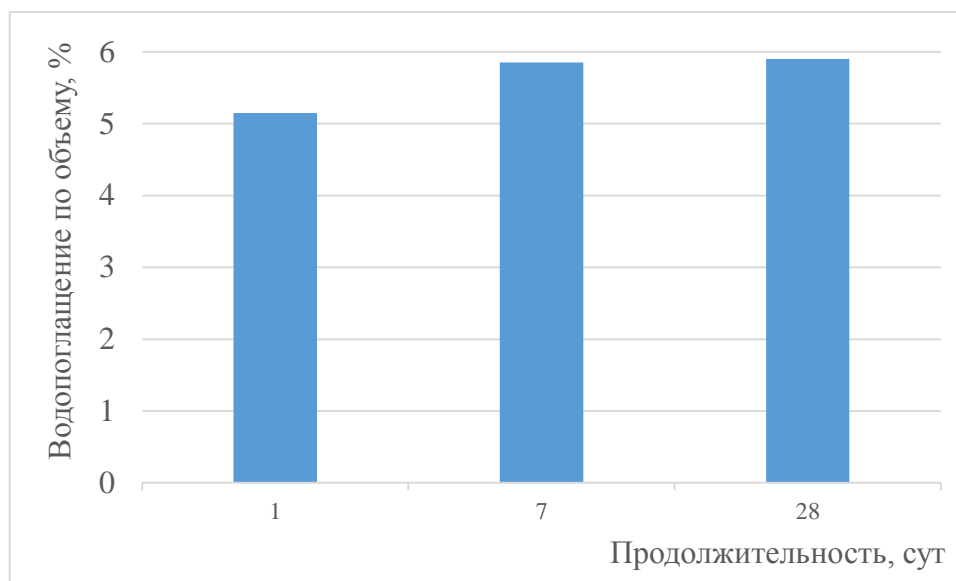


Рисунок 3.6 – Водопоглощение гранул ГПС по объему при различной продолжительности выдерживания их в воде.

Как известно, водопоглощение заполнителя зависит от его пористости, в частности от объема открытых пор. На рисунке 3.7 представлены результаты ртутной порозиметрии четырех различных фракций гранулированного пеностекла: «а» 0,16 - 0,63 мм; «б» 0,63 – 1,25 мм; «в» 1,25 – 2,5 мм; «г» 2,5 – 5 мм. Согласно данной методике, при давлении ртути от 0,001 до 113 МПа фиксируется совокупный объем и общее распределение открытых пор ГПС диаметром 0,004 – 113 мкм. По результатам видно, что суммарный объем открытых пор прямо пропорционален фракционному размеру ГПС.

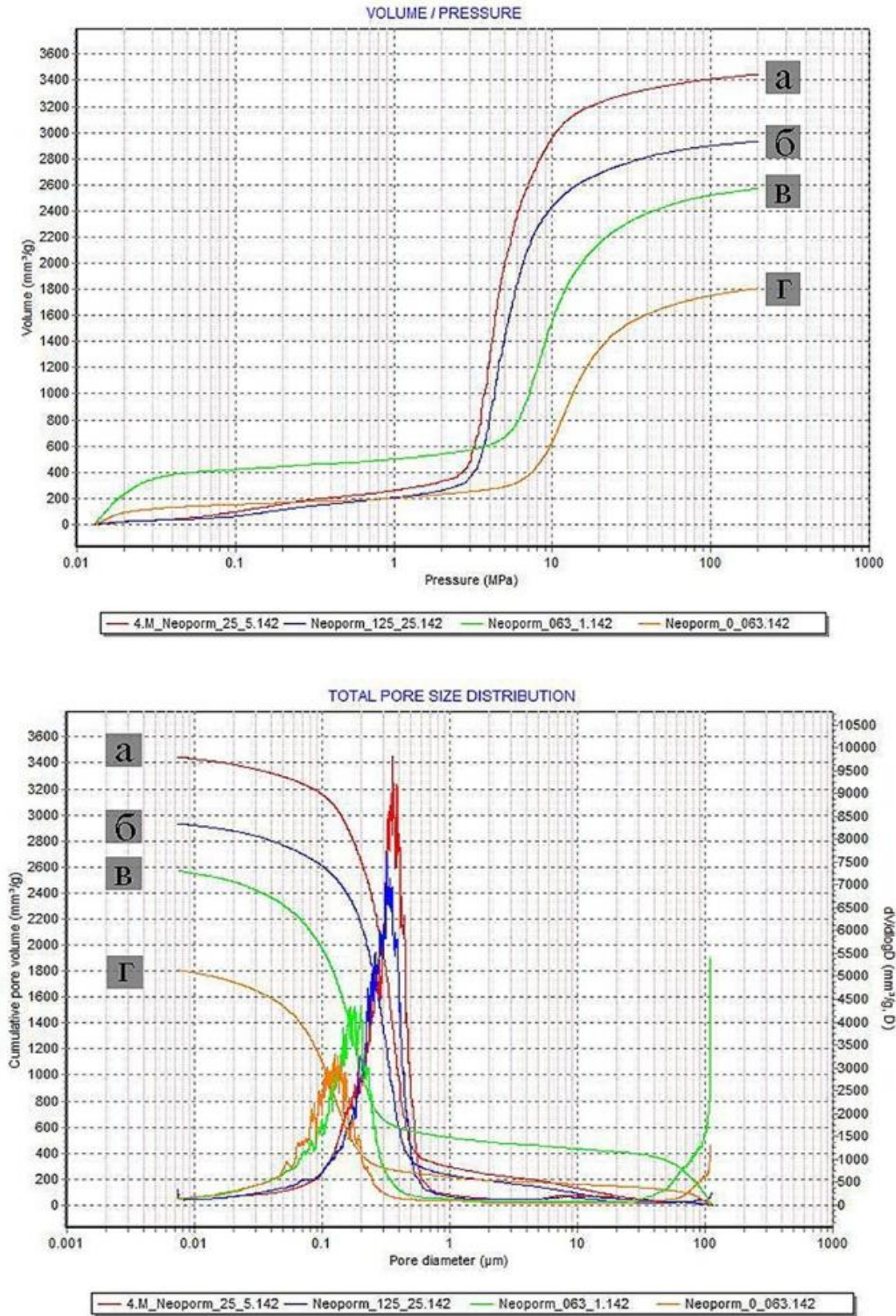


Рисунок 3.7 – Ртутная порозиметрия гранул фракции: а – 2.5 – 5 мм; б – 1.25 – 2.5 мм; в – 0.63 – 1.25 мм; г – 0 – 0.63 мм.

Согласно приведенному анализу, для всех фракций ГПС большинство пор из диапазона 0,004 – 113 мкм имеют диаметр 0,1 - 10 мкм и соответствуют размерам капиллярных пор (менее 20 мкм). При контакте с жидкостью поры и капилляры данного размера заполняются водой, которая под действием физических поверхностных сил значительно теряет свою подвижность. Происходит закупорка капилляров, вода удерживается капиллярными силами в межгранулярном пространстве, а также в шероховатостях и открытых внешних пустотах гранулы, однако закрытость внешних пор не позволяет проникать ей во внутреннее пространство гранулы. Стоит отметить, что при выдерживании гранул в жидкости ни одна гранула не опустилась на дно сосуда, а уровень воды не уменьшился. Это означает, что жидкость не заполнила пустое пространство пористой матрицы пеностекла, вытеснив воздух. Захваченная внешними порами вода в последствии может переходить обратно в цементный камень при гидратации, осуществляя более равномерное твердение бетона (метод «внутреннего ухода» за бетоном).

Таким образом, в работе применялась смесь гранулята пеностекла фракционного размера 0,16 - 5,00 мм. ГПС имеет развитую шероховатую поверхность с наличием открытых внешних пор. На поверхности наблюдается равномерное распределение ионов щелочных металлов натрия и калия, которые потенциально могут переходить из заполнителя в поровый раствор бетона, повышая интенсивность протекания реакции.

Помимо развитой шероховатой поверхности, ГПС имеет высокоразвитую пористую внутреннюю структуру, которая состоит из ячеек округлой формы. Развитая геометрия поверхности способствует хорошей адгезии заполнителя к цементному камню, а правильная ячеистая структура ГПС способствует высокой прочности бетона на его основе. Тем не менее, структурная целостность и физико-механические свойства ГПС могут варьироваться в зависимости от фракционного размера гранул. В межпоровых стенках гранулы наблюдается множество мелких каналов и капиллярных пор, соединяющих соседние ячейки, которые могут негативно сказываться на увеличении водопоглощения цементных композитов на

основе ГПС. Водопоглощение заполнителя по объему в зависимости от продолжительности экспозиции гранул в воде составило 5 - 6 %. Причем после первых семи суток контакта с жидкостью заполнитель практически полностью перестает сорбировать воду. Согласно приведенному порозиметрическому анализу, для всех фракций ГПС большинство пор из диапазона 0,004 – 113 мкм имеют диаметр 0,1 - 10 мкм и соответствуют размерам капиллярных пор, что является причиной затруднительной миграции воды в структуре заполнителя. Также сделан вывод о том, что при контакте ГПС с жидкостью вода удерживается капиллярными силами в межгранулярном пространстве, а также в шероховатостях и открытых внешних пустотах гранулы, однако закрытость внешних пор не позволяет ей проникать во внутреннее пространство гранулы.

На основе полученных данных отмечена перспективность использования ГПС в качестве пористого заполнителя для легких бетонов. При разработке состава легкого бетона необходимо учитывать высокую потенциальную реакционную способность ГПС к протеканию щелоче-силикантных реакций (ЩСР). Поэтому перед разработкой состава легкого бетона на основе гранулированного пеностекла (ГПС-бетона) необходима разработка методики, позволяющей комплексно оценить проявление ЩСР в ГПС-бетонах.

3.2 Разработка методики исследования реакционной способности заполнителя к протеканию ЩСР

Согласно российским стандартам, реакционная способность заполнителя к протеканию щелочной коррозии определяется по методикам, описанным в ГОСТ 8269.0 – 97. Описание методики ГОСТ приведено в главе 2. Ее недостаток заключается в том, что в методике испытываются непористые заполнители, применяемые в тяжелых бетонах. На данный момент в строительной практике

отсутствуют какие-либо стандарты, позволяющие оценить потенциальную реакционную способность пористых заполнителей.

С учетом изученных выше морфоструктурных особенностей ГПС в работе была предложена адаптированная методика, позволяющая комплексно оценить реакционную способность пористого ГПС к протеканию щелочной коррозии. В основе разработанной методики лежат методы, описанные в ГОСТ 8269.0-97. Разработанная методика состоит из четырех последовательных испытаний. Испытания № 1 и № 2 анализировали потенциальную способность заполнителя к взаимодействию со щелочами цемента, а № 3 и № 4 определяли степень проявления ЩСР непосредственно в ГПС-бетоне.

Принципиальные отличия методики испытания пористого заполнителя на реакционную способность от методики ГОСТ заключаются в некоторых отличных методах определения химического состава ГПС и количественного анализа взаимодействия ГПС с щелочной средой, а также дополнительных исследованиях, не представленных в методике ГОСТ.

Так как пеностекло представляет собой силикатный материал, получаемый пиропластичным методом, минерало-петрографический метод определения потенциально реакционноспособных модификаций кремнезема по показателю светопреломления не может быть применим для исследования ГПС. Поэтому для определения содержания реакционноспособного кремнезема в составе заполнителя было решено проводить более современные методики определения химико-минералогического состава, такие как рентгено-флуоресцентный анализ, а также рентгеновскую дифрактометрию. Также стоит отметить, что ГПС отличается высокопористой структурой и химической неоднородностью по объему. Поэтому при выдерживании заполнителя в щелочном растворе испытывались цельные гранул ГПС различного фракционного размера. А так как при подборе состава бетона учитывался весь диапазон фракционных размеров гранул 0,16–5,00 мм, то для исследования химического взаимодействия с щелочным раствором испытывались гранулы из всего диапазона фракционных размеров.

Для оценки адекватности полученных после испытаний на расширение бетонных балочек № 3 и № 4 дополнительно проводились микроструктурные и физико-механические исследования прошедших испытания образцов.

Предложенная методика испытаний ГПС на определение реакционной способности к проявлению ЩСР в легком бетоне на цементном вяжущем приведена в таблице 3.3. Если на любом этапе исследования результаты удовлетворяют требуемому условию, то заполнитель считается пригодным для использования в бетонах на цементном вяжущем. Если на протяжении эксперимента ни одно из условий выполнено не было, то заполнитель считается потенциально реакционноспособным. В этом случае необходимо применение превентивных мер против протекания ЩСР и проведение дополнительных исследований.

Таблица 3.3 – Предложенная методика испытаний ГПС на определение реакционной способности к проявлению ЩСР в легком бетоне на цементном вяжущем (отличие от методики ГОСТ)

№ п/п	Стандартная методика ГОСТ	Адаптированная методика
1.	Определение содержания реакционноспособного кремнезема в заполнителе с прим.:	
	минерало-петрографического анализа	химико-минерального анализа с применением флуоресцентной спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии
	<i>Условие: Содержание аморфного кремнезема в заполнителе не превышает 3 %</i>	
2.	Выдерживание в 1М растворе NaOH при 80 °С:	
	заполнителя, измельченного до крупности 0,315–0,16 мм	цельных гранул ГПС заданного фракционного размера
	<i>Условие: Концентрация ионов кремния в растворе после выдерживания в нем гранул составляет не более 50 ммоль/л</i>	
3.	Выдерживание в 1М растворе NaOH при 80 °С в течение 14 суток балочек на основе испытуемого заполнителя:	
	измельченного до крупности: [5–2,5] – 10 %; [2,5–1,25] – 25 %; [1,25–0,63] – 25 %; [0,63–0,315] – 25 %;	в виде цельных гранул ГПС фракционного размера: [5–2,5] – 60 %; [2,5–1,25] – 20 %;

	[0,315–0,16] – 15 %	[1,25–0,63] – 12,5 %; [0,315–0,16] – 7,5 %; дополнительное проведение микроструктурных исследований после испытания
	<i>Условие: Относительное удлинение образца бетона в ходе испытаний не превышает 0,1 %, при условии целостности микроструктуры заполнителя</i>	
4.	Выдерживание в климатической камере при 40 °С и отн. вл. 100 % в течение 12 месяцев балочек на основе испытываемого заполнителя:	
	измельченного до крупности: [5–2,5] – 10 %; [2,5–1,25] – 25 %; [1,25–0,63] – 25 %; [0,63–0,315] – 25 %; [0,315–0,16] – 15 %	в виде цельных гранул ГПС фракционного размера: [5–2,5] – 60 %; [2,5–1,25] – 20 %; [1,25–0,63] – 12,5 %; [0,315–0,16] – 7,5 %; дополнительное проведение микроструктурных и физико-механических исследований после испытания
	<i>Условие: Относительное удлинение образца бетона в ходе испытаний не превышает 0,04 %, при условии целостности микроструктуры заполнителя и снижении прочности образцов не более 30 %</i>	

3.3 Исследование потенциальной реакционной способности заполнителя к взаимодействию со щелочами (испытание № 1 и № 2)

При испытании № 1 проводился химико-минералогический анализ ГПС с применением метода рентгено-флуоресцентной спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии, результаты которых представлены в таблице 3.4 и на рисунке 3.7. Содержание оксидов кремния, натрия, кальция и других соединений в ГПС составляет порядка 70%, 13%, 10% и 7%, соответственно. По результатам минерало-фазового анализа с применением рентгеновского дифрактометра выявлено, что 100% вещества ГПС является рентгеноаморфным. Таким образом, ГПС имеет натрий-кальций-силикатную рентгеноаморфную природу, содержание кислого аморфного стекла в нем превышает допустимое значение в 3%, что говорит о необходимости проведения следующего испытания №2.

Таблица 3.4 – Химический состав гранулированного пеностекла марки «Неопорм» компании ОАО «СТЭС – Владимир», масс %

SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Другие
70	13,5	9,5	4,5	1,5	1

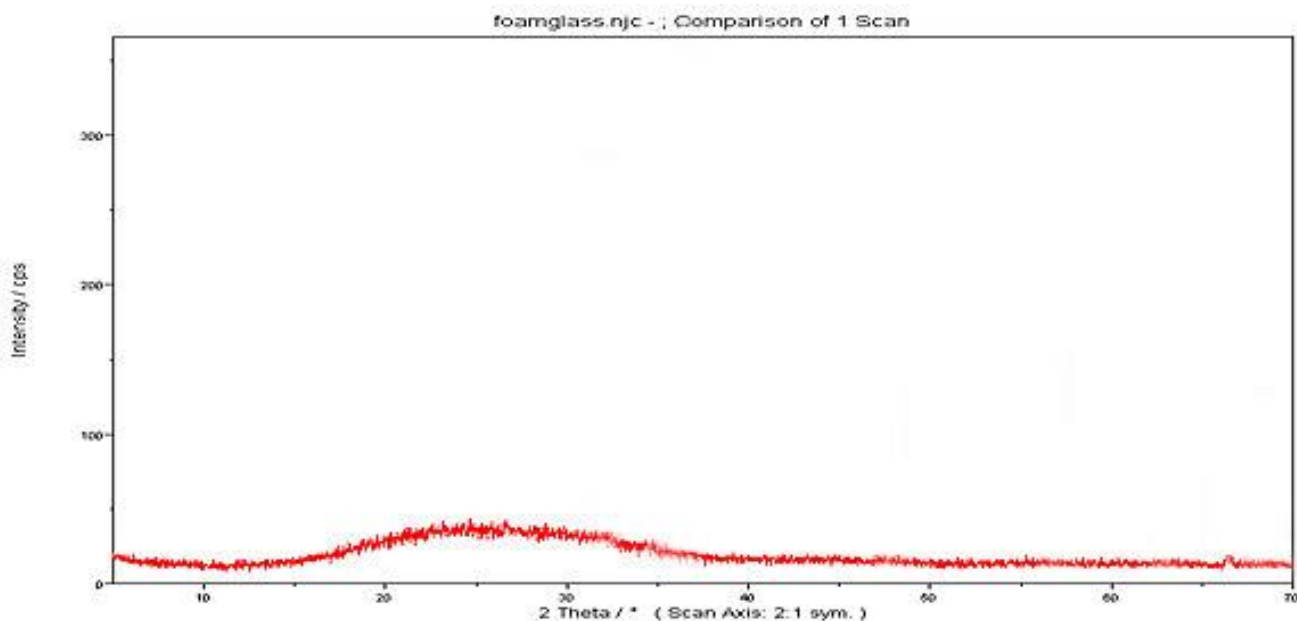


Рисунок 3.7 – Рентгенофазовый анализ гранулированного пеностекла марки «Неопорм» компании «СТЭС – Владимир». Результаты показывают полную рентгеноаморфность материала.

Перед проведением испытания №2 в работе дополнительно исследовалась проницаемость гранул пеностекла щелочном раствору бетона. Как известно, теплотехнические характеристики и долговечность бетонов на пористых заполнителях зависят от проницаемости заполнителя и связанности его ячеек друг с другом. Для исследования взаимодействия ГПС с щелочной средой бетона гранулы в течение месяца были выдержанны в растворе, соответствующем химическому составу поровой жидкости бетона («поровый раствор»). Для этого цемент марки ЦЕМ I 42,5 Н был смешан с дистиллированной водой в соотношении 1:2,5. После фильтрации значение водородного показателя раствора было доведено

до $pH=12,5$ путем введения извести. Температура раствора во время эксперимента составляла $22-24^{\circ} C$. На рисунке 3.8 представлена микроскопия краевых зон гранулы, выдержанной в «поровом растворе». Как видно из рисунка 3.8 «а», после взаимодействия с щелочным раствором стенки гранулы остались целостными. На поверхности гранулы не наблюдается продуктов реакции щелочей с кремнеземом. Однако при наличии дефектов на поверхности гранулы (рисунок 3.8 «б», «в») увеличивается удельная площадь взаимодействия кремнезема с щелочным раствором, что ведет к образованию продуктов реакции на внешних открытых участках пор заполнителя. Для определения проницаемости щелочного раствора во внутренние ячейки гранул исследовалось изменение химического состава в поровой структуре гранулы после месячной экспозиции в «поровом растворе» бетона при температуре $22-24^{\circ} C$ (рисунок 3.9). Для этого было проведено энергодисперсионное сканирование краевых участков срезов эталонной, не подвергавшейся воздействию щелочей бетона, а также гранулы после экспозиции. Как видно, эталонная гранула имеет равномерное распределение всех элементов в своей структуре, за исключением некоторых преобладаний алюминия на покрытых каолином участках поверхности гранулы. Как правило, образованный в ходе деполимеризации кремнезема силикатный гель характеризуется повышенным содержанием щелочных металлов в своем составе. Так как пеностекло произведено из натрий-кальций-силикатного стекла, и содержание натрия в структуре пеностекла высоко, образование продуктов реакции определялось по калию, повышенное содержание которого на стенках можно зафиксировать на открытых наружных ячейках ГПС. В то же время, во внутренних ячейках ГПС наблюдается низкое содержание равномерно распределенного калия. Отсутствие образований продуктов реакции во внутренних порах говорит о том, что за время месячной экспозиции гранул проникновения щелочного раствора в структуру ГПС не произошло.

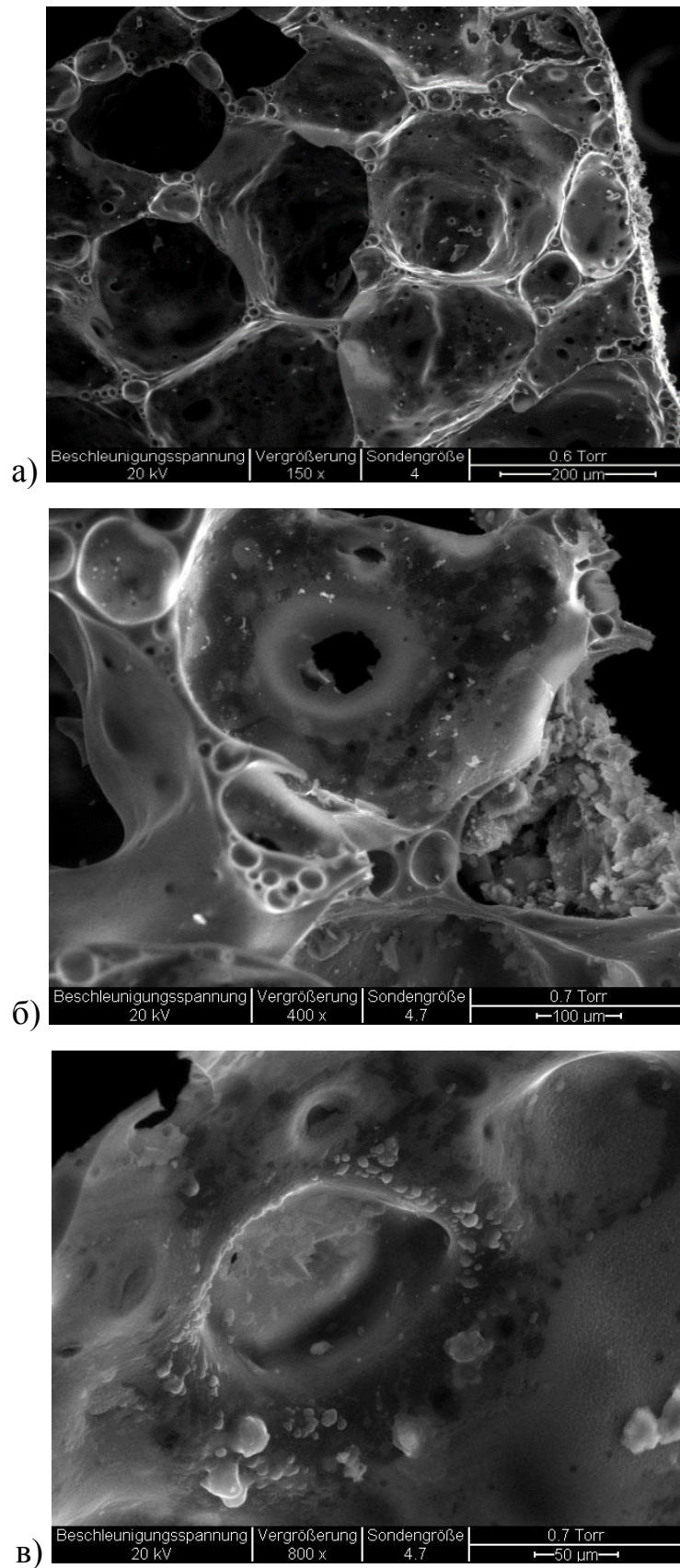


Рисунок 3.8 – Микроскопия краевых зон гранулы, выдержанной в поровом растворе бетона.

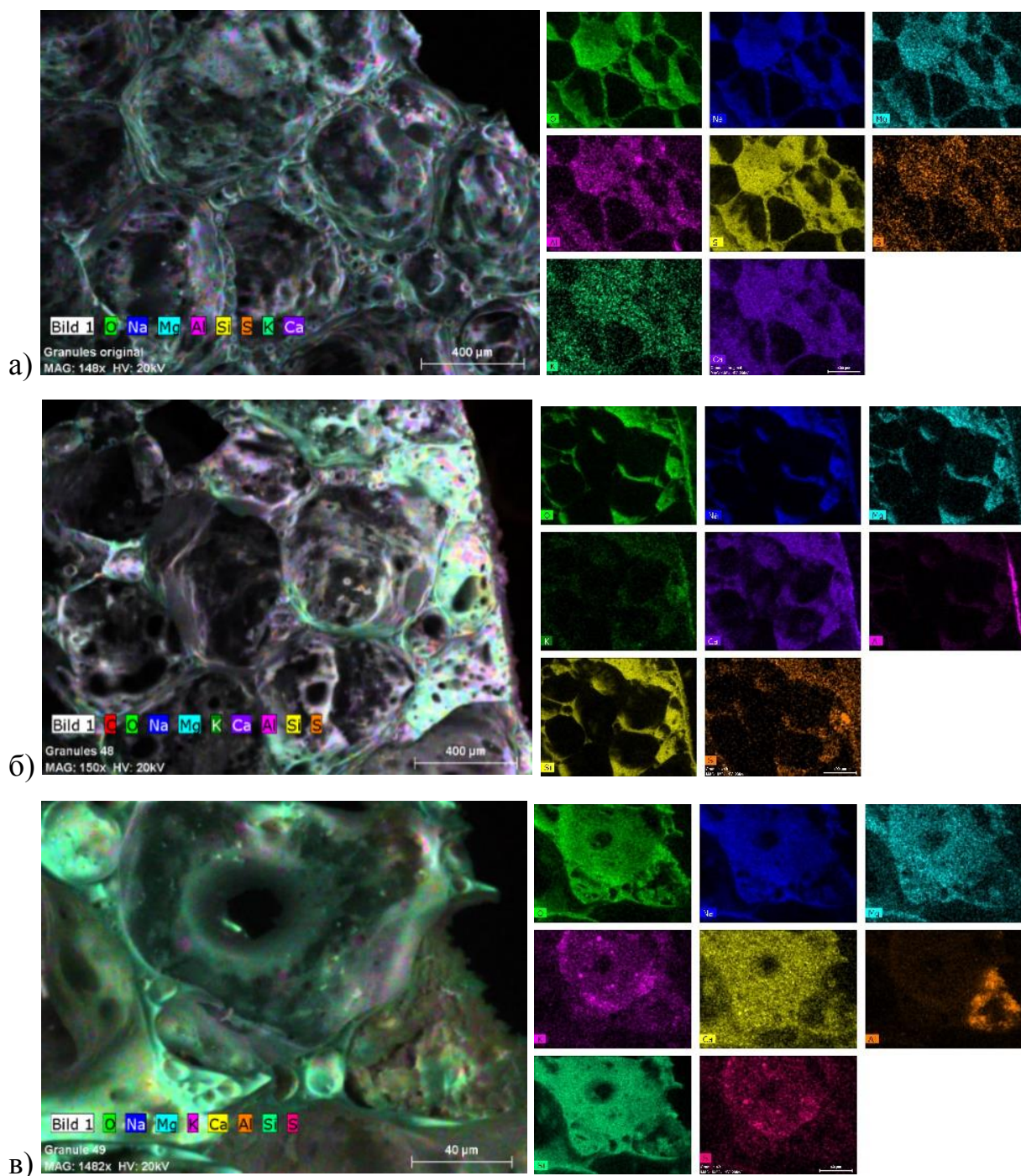


Рисунок 3.9 – Энергодисперсионное сканирование краевых участков гранул ГПС, а – эталонная, б, в – подвергавшихся месячной экспозиции в «поровом растворе».

На основе того, что после месячной экспозиции ГПС в щелочном растворе не наблюдается образования продуктов реакции щелочей с кремнеземом во

внутренних ячейках ГПС, можно судить о непроницаемости пористой матрицы ГПС для щелочного порового раствора бетона, даже не смотря на наличие капиллярных каналов между ячейками ГПС.

В силу закрытости ячеек ГПС щелочная реакция заполнителя с щелочами бетона будет происходить с поверхности гранул. Содержание оксидов кремния и натрия в составе ГПС составляет порядка 70% и 13%, соответственно (таблица 3.2). Для определения химического взаимодействия гранул с поровым раствором цементного камня при обычных температурах, определялась концентрация ионов Na^+ и Si^{4+} в «поровом растворе» после месячного выдерживания в нем гранул крупной и мелкой фракций ГПС при температуре 22-24° С методом оптической эмиссионной спектроскопии (рисунок 3.10). По сравнению с эталонным поровым раствором, после месячной экспозиции в нем ГПС крупной (2,5 – 5 мм) и мелкой (0,16 – 0,63 мм) фракций концентрация ионов натрия возрастает в 1,5 и 2 раза соответственно (рисунок 3.10 «а»). Это означает, что при контакте заполнителя с поровым раствором при обычных температурах щелочные ионы способны переходить с поверхности гранул в раствор. На основе полученных данных можно сделать вывод, что ГПС способно увеличивать концентрацию щелочных ионов порового раствора бетона и способствовать протеканию реакции даже при низком содержании щелочей в цементном камне. Как видно из рисунка 3.10 «б», при выдерживании крупной фракции ГПС в поровом растворе концентрация ионов кремния возрастает с 20 до 300 мкмоль/л. Это означает, что под действием щелочного раствора силановые связи кремнезема заполнителя разрушаются и ионы кремния переходят в раствор. Активность протекания реакции зависит от удельной поверхности взаимодействия кремнезема с щелочной средой бетона. При уменьшении фракции ГПС возрастает удельная поверхность и ионы кремния переходят в раствор более активно. Концентрация ионов кремния в растворе после выдерживания в нем мелкой фракции ГПС 0,16 – 0,63 мм составила 600 мкмоль/л., что означает, что говорит о большей реакционной способности мелкой фракции ГПС.

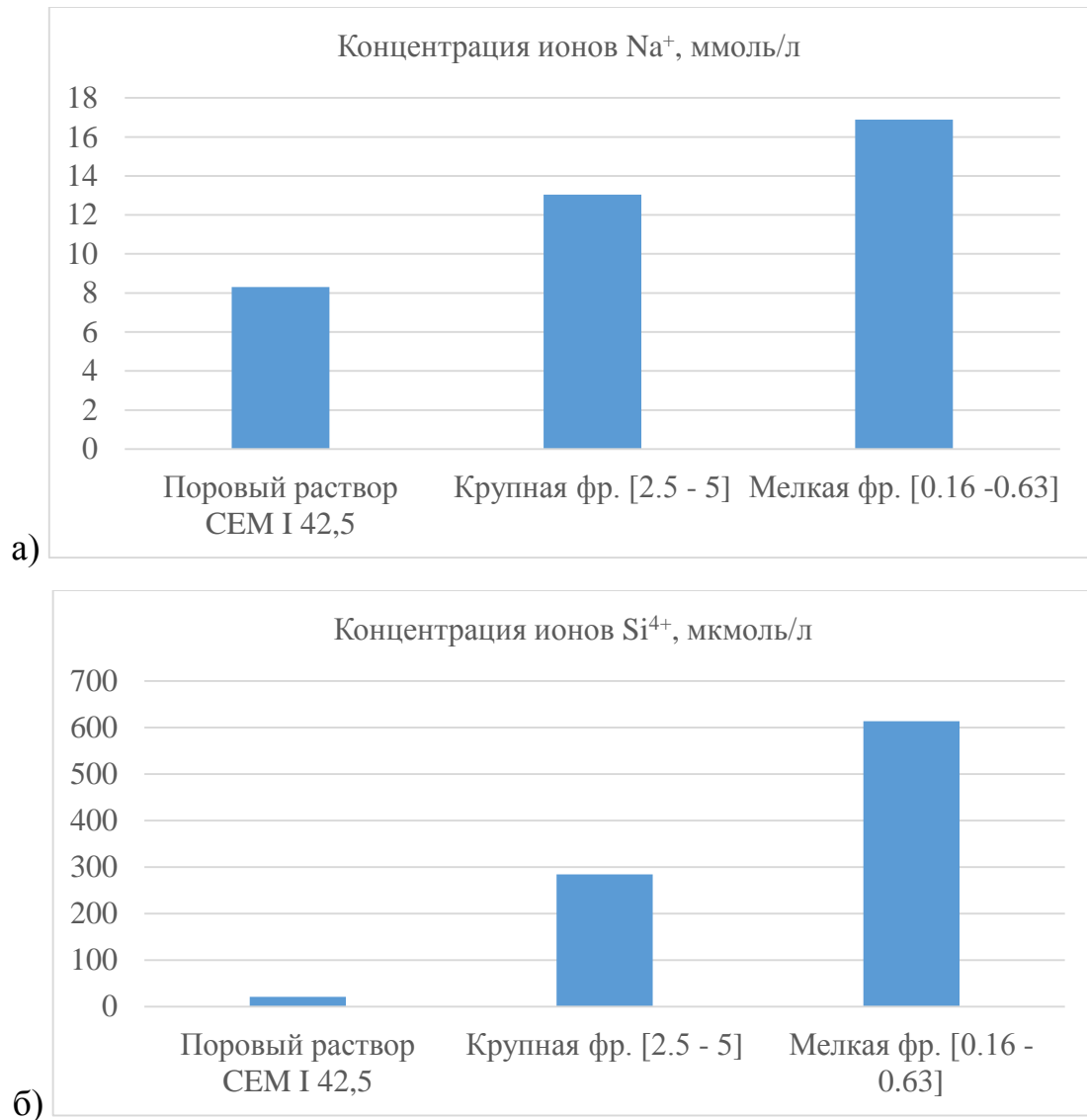


Рисунок 3.10 – Концентрация ионов Na^+ и Si^{4+} в поровом растворе бетона после месячной экспозиции в нем гранул: а – мелкой (0,16 – 0,63 мм), б – крупной (2,5 - 5) фракции ГПС при температуре 22-24 °С.

Испытание №2 позволяет количественно оценить реакционную способность заполнителя к взаимодействию со щелочами бетона. На данном этапе исследований заполнитель различного фракционного состава (0,12 - 0,63; 0,63 - 1,25; 1,25 - 2,5; 2,5 - 5 мм) помещался в одномолярный раствор NaOH и выдерживался при 80 °С в течение одних суток. В полипропиленовые колбы емкостью 60 мл помещался гранулят различной фракции объемом 5 мл. Приготавливался 1М раствор NaOH . В каждую колбу добавлялось по 10 мл

щелочного раствора, закрывалось крышкой и помещалось в заранее прогретую камеру, поддерживающую постоянную температуру 80 °С. Каждые 6 часов содержимое колб взбалтывалось. После 24ч ±15 минут колбы извлекались. Содержимое отфильтровывалось от гранулята и далее химический анализ растворов был проведен с помощью оптической эмиссионной спектроскопии. Конечные концентрации ионов натрия и кремния после выдерживании гранулята 1М растворе NaOH при 80 °С представлены на рисунке 3.11. Как и в предыдущем эксперименте, концентрация ионов натрия в растворе после экспозиции повышается, однако из-за более высокой насыщенности исходного раствора щелочами, лишь в 1,2 – 1,3 раза. Согласно методике, при концентрации ионов кремния в растворе после экспозиции более 50 ммоль/л заполнитель считается реакционным. Как видно из полученных результатов, все фракции ГПС являются потенциально реакционноспособными в бетоне, причем с уменьшением фракционного размера ГПС реакционная способность возрастает.

Таким образом, по результатам испытания № 1 выявлено, что ГПС имеет натрий-кальций-силикатную рентгеноаморфную природу высокой реакционной способности к взаимодействию со щелочами цемента. При контакте заполнителя с «поровым раствором» бетона при обычных температурах щелочные ионы и разрушенные под действием щелочей бетона деполимеризованные силановые связи с поверхности заполнителя способны переходить с поверхности гранул в раствор. После прохождения испытания №2 ГПС был определен как потенциально реакционноспособный заполнитель в бетоне, причем с уменьшением фракционного размера реакционная способность заполнителя возрастает.

Согласно разработанной методике, при высоком содержании химически активного аморфного кремнезема в заполнителе необходимо исследование его реакционной способности непосредственно в бетоне при прохождении ускоренных испытаний на расширение бетонных балочек (№ 3 и № 4).

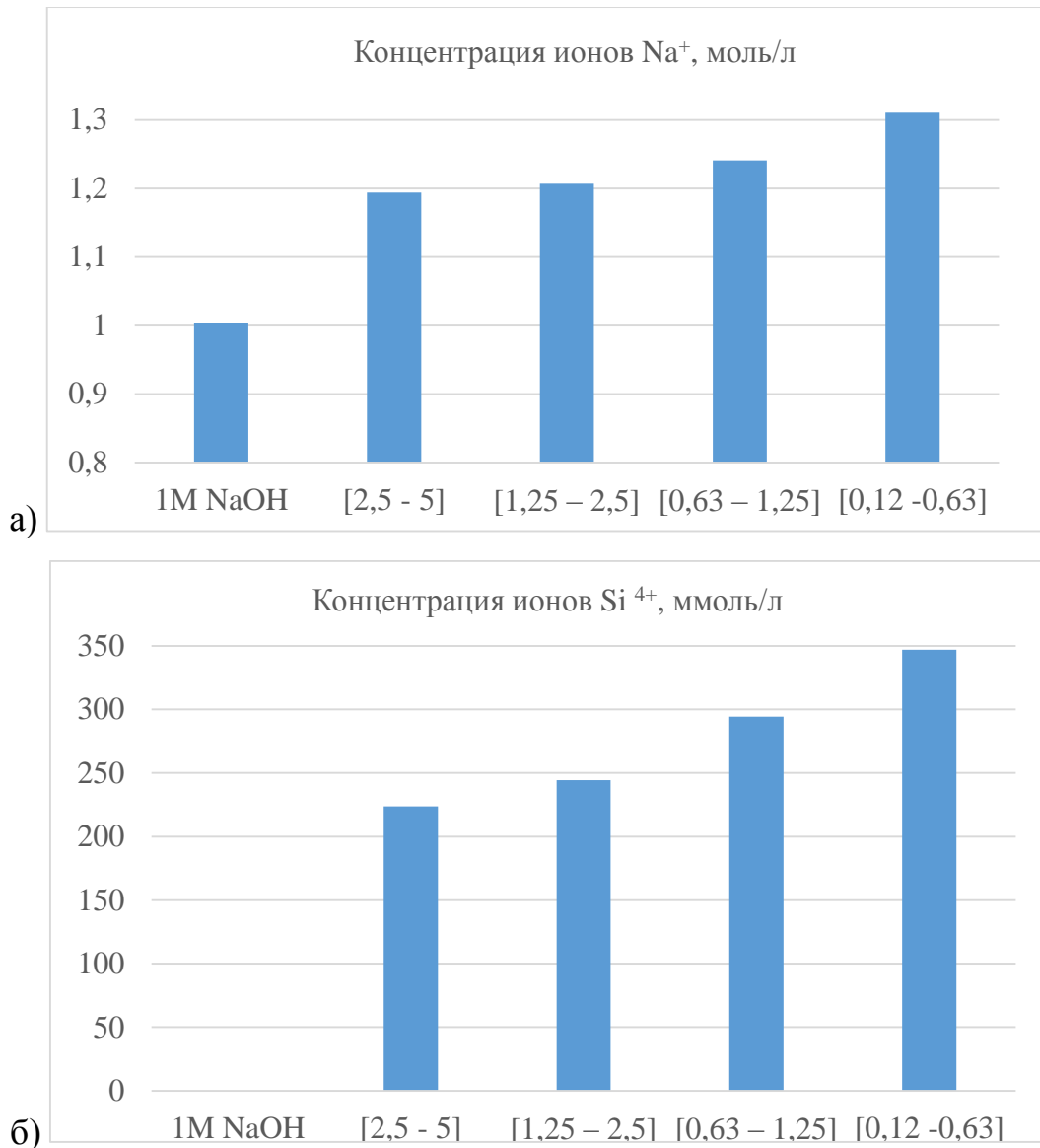


Рисунок 3.11 – а – Количество выщелаченного кремнезема, б – итоговая концентрация ионов натрия после выдерживания ГПС различного фракционного состава в 1М растворе NaOH при 80 °С в течение суток.

3.4 Разработка состава ГПС-бетона

Для проведения испытания № 3 и № 4 подбирался оптимальный состав легкого конструктивно-теплоизоляционного ГПС-бетона максимальной прочности при плотности 400–800 кг/м³.

В зависимости от заданных параметров вспенивания стекольной шихты, гранулометрия итоговой смеси ГПС может регулироваться в широких пределах. В настоящем исследовании использовалась смесь гранулированного пеностекла, имеющая следующий фракционный состав, масс. %: 0,16-0,63 мм – 5, 0,63-1,25 мм – 10, 1,25-2,5 мм – 25, 2,5-5,0 мм – 60 (рисунок 3.12). При подборе состава учитывались физико-механические характеристики ГПС, которые находятся в зависимости от фракционного размера гранул (таблица 3.5).

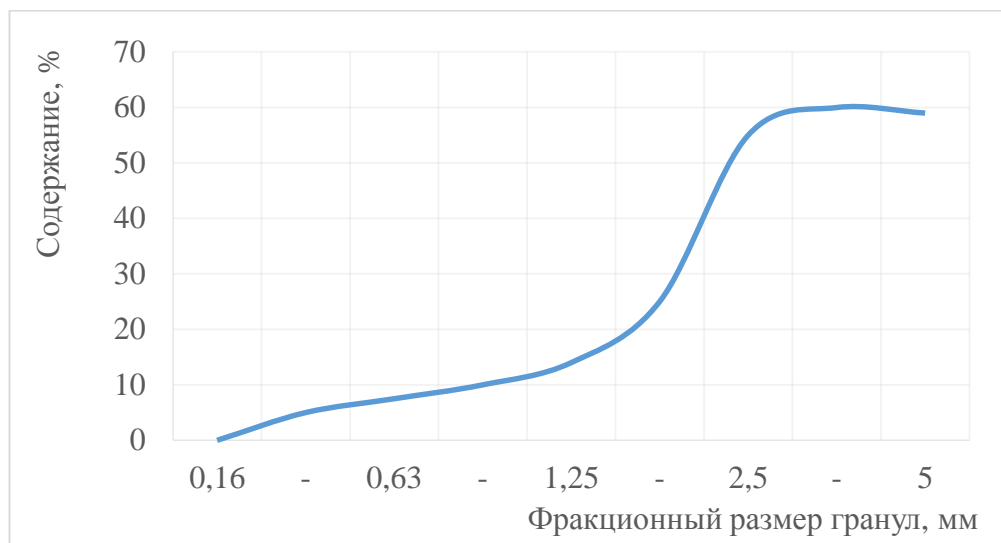


Рисунок 3.12 – Распределение фракционного состава ГПС.

Таблица 3.5 – Физико-механические характеристики ГПС в зависимости от фракционного размера гранул

Фракционный состав, мм			
0,16–0,63	0,63–1,25	1,25–2,5	2,5–5
Насыпная плотность в сухом состоянии, кг/м ³			
250	180	150	130
Прочность на сжатие в цилиндре, МПа			
2,5–2,7	2,0–2,2	1,8–2,1	1,5–2,0
Коэффициент конструкционного качества, %			
11–12	12–13	13–14	14–15

Как правило, цементные композиты представляют собой трехфазную систему: цементный камень, заполнитель и переходная межфазная зона. Свойства бетона определяются качеством всех его составляющих. Прочностные свойства легкого бетона во многом зависят от прочности сцепления заполнителя с цементным камнем. Различие прочностных характеристик заполнителя и цементного камня ведет к возрастанию концентраций напряжений в переходной зоне, которые могут компенсироваться прочной переходной зоной цементный камень-заполнитель. Для достижения высоких физико-механических и эксплуатационных характеристик легкого бетона необходимо формирование прочной межфазной зоны между заполнителем и цементной матрицей, которая определяется геометрией поверхности заполнителя и подвижностью цементного теста. Легковесные пористые заполнители имеют развитую шероховатую поверхность, которая характеризуется высокой водопотребностью, изменяющейся при варьировании фракционного состава смеси заполнителя. Таким образом, физико-механические свойства легкого бетона на пористых заполнителях находятся в зависимости от фракционного состава заполнителя и водоцементного отношения.

Согласно литературным данным, на практике композиционный состав легких бетонов плотностью ниже 800 кг/м^3 определяется экспериментальным путем. В настоящем исследовании подбирался состав конструкционно-теплоизоляционного ГПС-бетона наибольшей прочности при плотности не более $700\text{-}800 \text{ кг/м}^3$.

Для подбора рецептуры композита был применен аппарат математического планирования эксперимента. Актуальность применения математической теории планирования эксперимента выражена в перспективе значительного сокращения числа опытов при обеспечении требуемой сходимости результатов. В качестве параметров оптимизации поставленной задачи подбора оптимального подбора оптимального по физико-механическим характеристикам состава цементного композита состава цементного композита были выбраны итоговая плотность и прочность разрабатываемого композита. Как было указано выше, наиболее важными параметрами при подборе составов легких бетонов являются

гранулометрический состав заполнителя и водоцементное отношение. Так как не менее 60% гранулята имеют фракционный размер 2,5 – 5,0 мм, то исходная смесь была условно разделена по размеру фракций на две группы: «крупную» и «мелкую». Гранулы крупной фракции имели диаметр 2,5 – 5,0 мм, соответственно гранулы мелкой фракции: 0,16 – 2,5 мм. Фракционный состав смеси гранул мелкой фракции в свою очередь составлял, масс. %: 0,16-0,63 мм – 12,5, 0,63-1,25 мм – 25, 1,25-2,5 мм – 62,5. В качестве основных технологических факторов варьирования были взяты: процентное содержание крупной фракции пеностекла и водоцементное отношение. В таблице 3.6 показаны основные параметры проведения эксперимента. Процентное содержание (по массе) крупной фракции пеностекла варьировалось от 30 до 90%. Водоцементное отношение находилось в пределах от 0.3 до 0.6. Каждый фактор эксперимента определялся тремя уровнями варьирования. За нулевой уровень факторов были взяты $X_1 = 60\%$, $X_2 = 0,45$. Интервал варьирования равнялся 30% и 0,2 для X_1 и X_2 соответственно.

Таблица 3.6 – Параметры проведения эксперимента

Технологические факторы	Обозначение Факторов	Единица измерения	Основной уровень $X=0$	Интервал варьирования, X	Уровни варьирования		
					-1	0	+1
Содержание (по массе) крупной фракции пеностекла (2,5 – 5 мм)	X1	%	60	30	30	60	90
Водоцементное отношение	X2	-	0,45	0,2	0,5	0,7	0,9

Образцы легкого бетона на основе гранулированного пеностекла изготавливались и испытывались согласно ГОСТ 10180-90. «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Обработка результатов эксперимента проводилась согласно ГОСТ Р 50779.10-2000 «Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения».

Согласно матрице планирования двухфакторного эксперимента, изготавливались 9 бетонных смесей по три образца. Содержание цемента составило около 300 кг/м³ (Отношение вяжущего к заполнителю по массе составляло 2 к 1). На 28-ые сутки определялись плотность и прочность образцов. Результаты измерения плотности образцов представлены в таблице 3.7. Так как все измерения являются равноточными, то в качестве оценки истинного значения плотности было принято среднее арифметическое значение результатов измерений.

Таблица 3.7 – Результаты измерения плотности образцов на 28-ые сутки

№ п/п	1 кг/м ³	2 кг/м ³	3 кг/м ³	Среднее арифметическое (y_u), кг/м ³
1	531	587	561	560
2	480	487	468	478
3	695	672	688	685
4	609	584	605	599
5	546	581	554	560
6	702	713	713	709
7	762	742	743	749
8	589	595	591	592
9	641	626	600	622

Для определения случайных ошибок измерений для каждого опыта матрицы планирования был определен квадрат среднего квадратического отклонения, или дисперсия s_j^2 (формула 3.1):

$$s_j^2 = \frac{1}{n_0 - 1} * [\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2] \quad (3.1)$$

При равномерном дублировании опытов однородность (воспроизводимость) ряда дисперсий проверяют с помощью G-критерия Кохрена (формула 3.2):

$$G_p = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{j=1}^N s_j^2} = \frac{s_{\max}^2}{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_n^2} \quad (3.2)$$

Под числом степеней свободы в статистике понимают разность между числом опытов и количеством коэффициентов модели, вычисленных по результатам этих опытов независимо друг от друга. Число степеней свободы f определяется по формуле 3.3:

$$f = N - (k + 1) \quad (3.3)$$

где N – число опытов или число строк матрицы планирования, k – число факторов, в нашем случае при использовании модели, выраженной полиномом второго порядка, $f=3$.

Табличное значение G_T для девяти сравниваемых дисперсий при трех степенях свободы равен 0,3733. $G_p = 0,2341 < 0,3733$. Так как выполняется требование $G_p < G_T$, то исследуемая величина $\{y\}$ подчиняется нормальному закону (дисперсии являются однородными). Если дисперсии s_j^2 опытов однородны, то дисперсию s_y^2 воспроизводимости эксперимента вычисляют по формуле 3.4:

$$s_y^2 = \frac{1}{N} * [\sum_{j=1}^N s_j^2] \quad (3.4)$$

$$s_y^2 = \frac{1}{9} * [1833,8] = 203,76$$

При условии воспроизводимости процесса опытов план-матрицы далее рассчитываются коэффициенты регрессии. Полным факторным экспериментом (ПФЭ) называют такой эксперимент, при реализации которого определяется значение параметров оптимизации при всех возможных сочетаниях уровней варьирования. Условия проведения полного двухфакторного эксперимента представлены в таблице 3.7. Значения средней плотности результатов эксперимента были округлены до 5.

Таблица 3.7 – Условия проведения полного двухфакторного эксперимента

№ п/п	Уровни переменных факторов				Результат эксперимента
	X ₁	X ₂	Натуральные значения		
			X ₁ , %	X ₂	
1	+	+	90	0,6	560
2	+	-	90	0,3	480
3	-	+	30	0,6	685
4	-	-	30	0,3	600
5	+	0	90	0,45	560
6	-	0	30	0,45	710
7	0	+	60	0,6	750
8	0	-	60	0,3	590
9	0	0	60	0,45	620

Полученные результаты эксперимента использовались для разработки математической модели исследуемого процесса. Математическая модель представляет собой функцию отклика, связывающую параметры оптимизации, в данном случае это плотность композита, и факторы, влияющие на параметр оптимизации, а именно содержание (по массе) крупной фракции пеностекла (2,5 –

5 мм) и водоцементное соотношение. В данном случае функция отклика выражалась полиномом второй степени вида (формула 3.5):

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_{12} \quad (3.5)$$

Значения коэффициентов регрессии вычислялись по формуле 3.6:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2} \quad (3.6)$$

где i – номер фактора; j – номер строки или опыта в матрице планирования; y_j – значение параметра оптимизации в i -ом опыте; $x_{i,j}$ – кодированные значения (± 1) факторов в j -м опыте, N – число строк или опытов в матрице планирования.

$$b_0 = \frac{560+480+685+600+560+710+750+590+620}{9} = 617,22;$$

$$b_1 = \frac{560+480-685-600+560-710}{6} = -65,83;$$

$$b_2 = \frac{560-480+685-600+750-590}{6} = 54,16;$$

$$b_{11} = \frac{\frac{560}{3} + \frac{480}{3} + \frac{685}{3} + \frac{600}{3} + \frac{560}{3} + \frac{710}{3} - \frac{2 \cdot 750}{3} - \frac{2 \cdot 590}{3} - \frac{2 \cdot 620}{3}}{6 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 + 3 \cdot \left(-\frac{2}{3}\right)^2} = -54,17;$$

$$b_{22} = \frac{\frac{560}{3} + \frac{480}{3} + \frac{685}{3} + \frac{600}{3} - \frac{2 \cdot 560}{3} - \frac{2 \cdot 710}{3} + \frac{750}{3} + \frac{590}{3} - \frac{2 \cdot 620}{3}}{6 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 + 3 \cdot \left(-\frac{2}{3}\right)^2} = -19,1;$$

$$b_{12} = \frac{560-480-685+600}{4} = -1,25;$$

Для перехода к записи уравнения полинома второй степени, по формуле 3.7 определяли величину b_0 .

$$b_0 = b_0^{\cdot} - \sum_{1 < i < k} \sqrt{\frac{2^k}{n}} b_{ii} \quad (3.7)$$

где k – число факторов.

$$\varphi = \sqrt{\frac{2^2}{9}} = \frac{2}{3}; \quad b_0 = 617,22 - \frac{2(-54,17-19,17)}{3} = 666,11;$$

Проверка значимости каждого коэффициента проводилась независимо. Она осуществляется сравнением абсолютного значения коэффициента с его доверительным интервалом (формула 3.8 и 3.9).

$$|b_i| \geq \Delta b_i; \quad (\text{формула 3.8})$$

$$\text{при} \quad \Delta b_i = t_T \frac{S_y}{\sqrt{n}}; \quad (3.9)$$

где S_y - дисперсия воспроизводимости, t_T табличное значение критерия Стьюдента, для $f=3$ $t_T=3,18$.

$$s_y^2 = \frac{1}{9} * [1833,8] = 203,76$$

Доверительный интервал $\Delta b_i = 15,13$. Коэффициенты регрессии b_0 , b_1 , b_2 , b_{11} , b_{22} больше доверительного интервала Δb_i , значение параметра t_p для каждого из коэффициентов превышает табличное t_T , поэтому коэффициенты принимаются статически значимыми. Коэффициент b_{12} считаем статически незначимым. Полученное уравнение регрессии представлено в формуле 3.10:

$$y = 666,11 - 65,83 \cdot x_1 + 54,16 \cdot x_2 - 54,17 \cdot x_1^2 - 19,17 \cdot x_2^2 \quad (3.10)$$

После расчета коэффициентов модели и проверки их значимости определяют пригодность полученной модели. Модель является пригодной, если предсказанное с помощью модели значение параметра оптимизации не отличается от фактического больше, чем на некоторую заранее заданную величину. Проверка

пригодности модели называется проверкой адекватности модели и производится по F-критерию Фишера. После расчета коэффициентов модели и проверки их значимости определяют дисперсию $s_{ад}^2$ адекватности. Остаточная дисперсия или дисперсия адекватности, характеризует рассеяние эмпирических значений $\{y\}$ относительно расчетных (формула 3.11). Для вычисления дисперсии адекватности была составлена вспомогательная таблица 3.8.

$$s_{ад}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^N (y_u - \widehat{y}_u)}{f} \quad (3.11)$$

Таблица 3.8 – Вспомогательная таблица для расчета $s_{ад}^2$

№ п/п	y_u	\widehat{y}_u	$y_u - \widehat{y}_u$	$(y_u - \widehat{y}_u)^2$
1	560	581,14	-21,24	451,31
2	480	472,94	7,06	49,84
3	685	712,74	-22,74	517,11
4	600	604,54	-4,54	20,61
5	560	546,21	13,79	190,16
6	710	677,81	32,19	1036,20
7	750	701,04	48,96	2397,08
8	590	592,84	-2,84	8,07
9	620	666,11	-46,11	2126,13

Критерий Фишера вычисляется по формуле 3.12:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2}; \quad (3.12)$$

$$F_p = \frac{1699,129}{203,76} = 8,33;$$

Табличное значение критерия F_T при 5-% уровне значимости и числах степеней свободы 6 и 8 составляет $F_{(0,05,6,2)} = 19,330$. Так как $F_p < F_T$, то полученная математическая модель является адекватной экспериментальным данным. На рисунке 3.13 представлен график зависимости плотности полученного композита от содержания крупной фракции ГПС и водоцементного отношения:

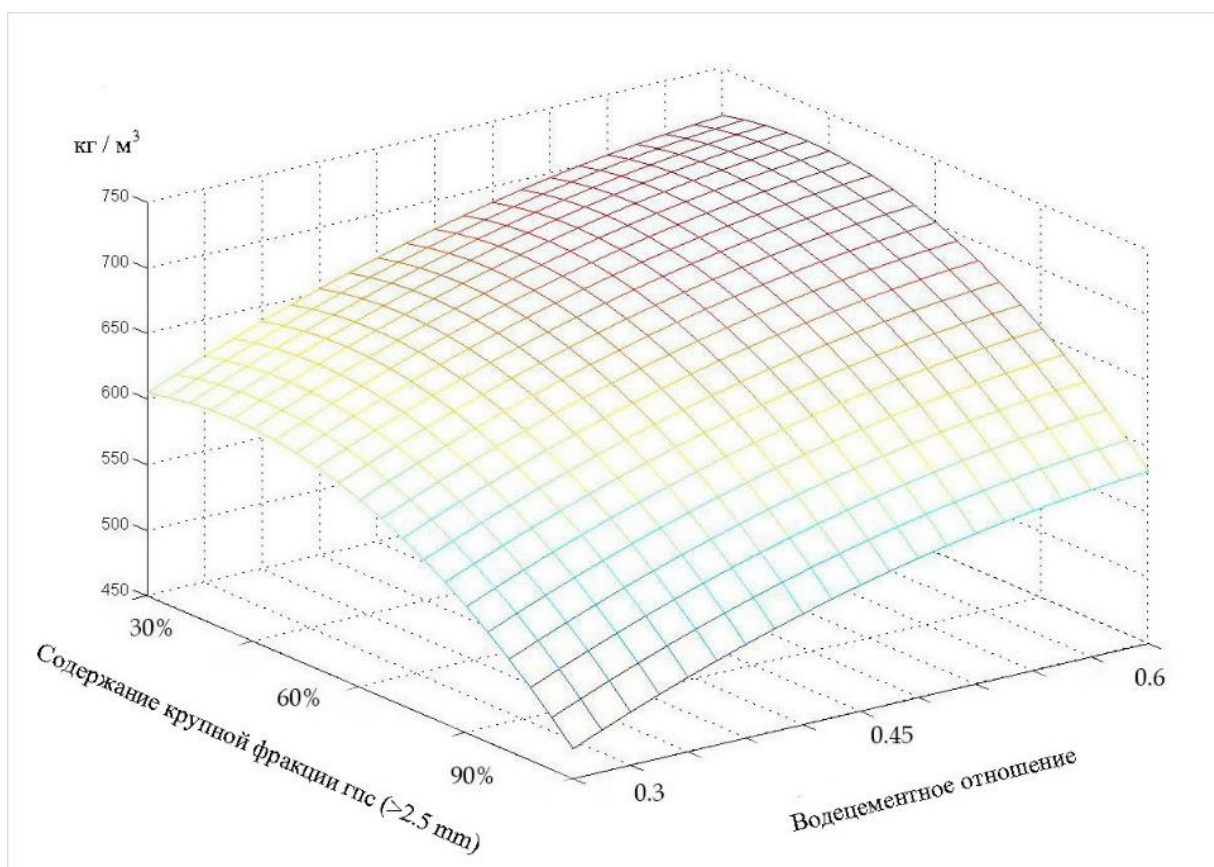


Рисунок 3.13 – График зависимости (функция отклика) плотности композита от содержания крупной фракции ГПС и водоцементного отношения.

Согласно приведенной выше матрице планирования полного двухфакторного эксперимента в результате опытов были определены как плотности образцов, так и их прочности на сжатие. Результаты измерения прочности образцов представлены в таблица 3.9. Аналогичным образом аппарат математического планирования регрессионного эксперимента был применен при

анализе результатов прочностей композита, которые были получены согласно той же матрице планирования двухфакторного эксперимента, что и для плотности.

Таблица 3.9 – Результаты измерения прочности образцов

№ п/п	1, МПа	2, МПа	3, МПа	4, МПа	Среднее арифметическое, МПа
1	2,72	2,63	2,4	2,35	2,53
2	0,9	0,79	0,73	0,71	0,78
3	5,37	5,22	4,8	4,77	5,04
4	2,23	2,04	2	1,91	2,05
5	1,84	1,84	1,81	1,77	1,82
6	3,55	3,48	3,23	3,02	3,32
7	6,05	5,16	5,15	4,97	5,33
8	1,31	1,3	1,17	0,97	1,19
9	2,77	2,53	2,35	2	2,41

Аналогичным образом аппарат математического планирования регрессионного эксперимента был применен при обработке полученных результатов. Была доказана воспроизводимость процесса опытов план-матрицы. После нахождения коэффициентов регрессии и проверки их на значимость было получено уравнение регрессии для параметра оптимизации - прочности композита (формула 3.13). Проверка по F-критерию Фишера доказала адекватность полученной модели.

$$y = 2,76 - 0,88 \cdot x_1 + 1,48 \cdot x_2 - 0,39 \cdot x_1^2 - 0,31 \cdot x_2^2 + 0,3 \cdot x_1 \cdot x_2$$

(3.13)

На рисунке 3.14 представлен график зависимости прочности полученного композита от содержания крупной фракции ГПС и водоцементного отношения:

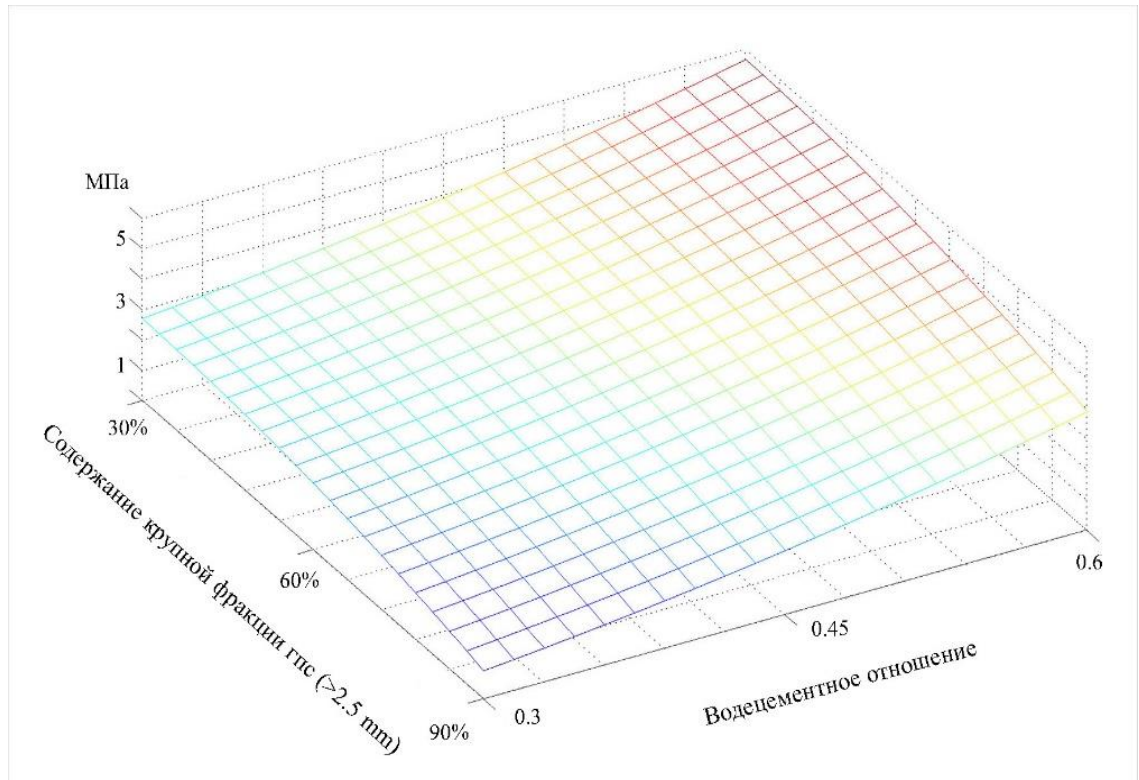


Рисунок 3.14 – График зависимости прочности композита от содержания крупной фракции ГПС и водоцементного отношения.

Таким образом, в настоящем исследовании подбирался состав ГПС-бетона наибольшей прочности при плотности не более $700-800 \text{ кг/м}^3$. Из анализа поверхностей отклика плотности и прочности композита можно сделать вывод, что максимальная прочность (порядка 5 - 6 МПа) достигается при наибольшем водоцементном отношении (0,6) и содержании крупной фракции ГПС 30-60%. При этом плотность композита не выходит за пределы 800 кг/м^3 . Согласно ГОСТ 25820-2000 «Бетоны легкие», прочности легких бетонов средней плотности D 400 и D 800 должны соответствовать составлять не менее 0,5 и 3,6 МПа, соответственно. Таким образом, гранулированное пеностекло позволяет получить легкий бетон широкой номенклатуры и области применения, прочностные показатели которого отвечают требованиям ГОСТ. Для достижения плотности более 800 кг/м^3 необходимо

применение мелких плотных заполнителей (кварцевого песка).

Как уже было отмечено выше, оптимальное водоцементное отношение при содержании цемента и ГПС 300 и 150 кг/м³, соответственно равняется 0,6. Согласно дополнительным проведенным экспериментам, при дальнейшем повышении водоцементного отношения наблюдается выраженная сегрегация композита, которая ведет к неравномерности его свойств по объему материала. Подсчитано, что при различных соотношениях факторов варьирования (в зависимости от используемого значения водоцементного отношения и гранулометрического состава) объемное содержание цементной пасты может составлять от 14 до 25%. На рисунке 3.15 показана зависимость прочности композита от объемного содержания цементной пасты. Максимальная прочность в 5 МПа достигается при применении 30%, либо 60% крупной фракции ГПС. Расчеты показывают, что содержание цементной пасты при 60% КФ ГПС составляет 22,35%, а при 30% КФ ГПС – 24,46%. Таким образом, использование 60% КФ ГПС обусловлено более выгодным расходом цемента и заполнителя, а также достижением максимальных показателей прочности и плотности композита. Данный результат совпадает с результатами, опубликованными в научных исследованиях, в которых наилучшая плотность упаковки компонентов композита достигается при значении содержания крупной фракции заполнителя 60-70%. Также стоит отметить, что применение в смеси композита более 60% КФ ГПС является более экономически рациональным, так как такое содержание КФ соответствует среднему содержанию крупной фракции в смеси после вспенивания.

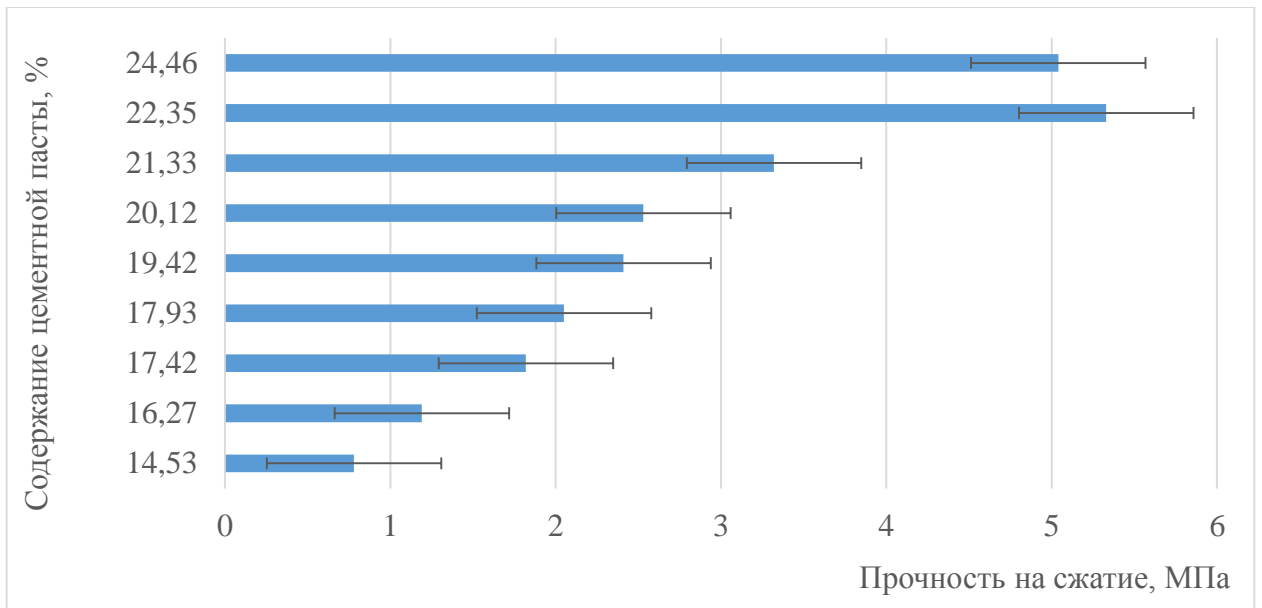


Рисунок 3.15 – Зависимость прочности композита от объемного содержания цементной пасты (с учетом погрешности).

Таким образом, оптимальным можно считать композиционный состав ГПС-бетона с содержанием крупной фракции 60% и водоцементным отношением 0.6. Стоит отметить, что прочность практически линейно возрастает с увеличением водоцементного отношения. Данный факт не является типичным для стандартных тяжелых бетонов, т.к. при увеличении водоцементного отношения в цементном камне увеличивается его пористость, а также содержание слабых фаз гидроксида кальция, что ведет к снижению прочности бетона. Увеличение прочности композита при увеличении водоцементного отношения можно объяснить тем, что при введении большего количества воды возрастает объем цементной пасты и ее подвижность. Текущая цементная паста проникает в поры и шероховатости на поверхности гранул, что ведет к лучшей адгезии заполнителя к цементному камню. На рисунке 3.16 «а» представлена зависимость деформации образцов ГПС-бетона от напряжения при различном водоцементном отношении. Видно, что при низком водоцементном отношении прочность композита не превосходит насыпной прочности гранул. При увеличении водоцементного отношения характер разрушения становится более соответствующий стандартным бетонам.

Предположение, что прочность композита зависит от подвижности цементной пасты подтверждается при применении ППАВ. На рисунке 3.16 «б» показана зависимость деформации ГПС-бетона от напряжения при различном содержании поликарбоксилатного суперпластификатора при постоянном водоцементном отношении 0.35. При добавлении 0,6% ППАВ от массы цемента наблюдается увеличение прочности композита в 3.5 раза и улучшение его трещиностойкости по сравнению с бездобавочным контрольным составом.

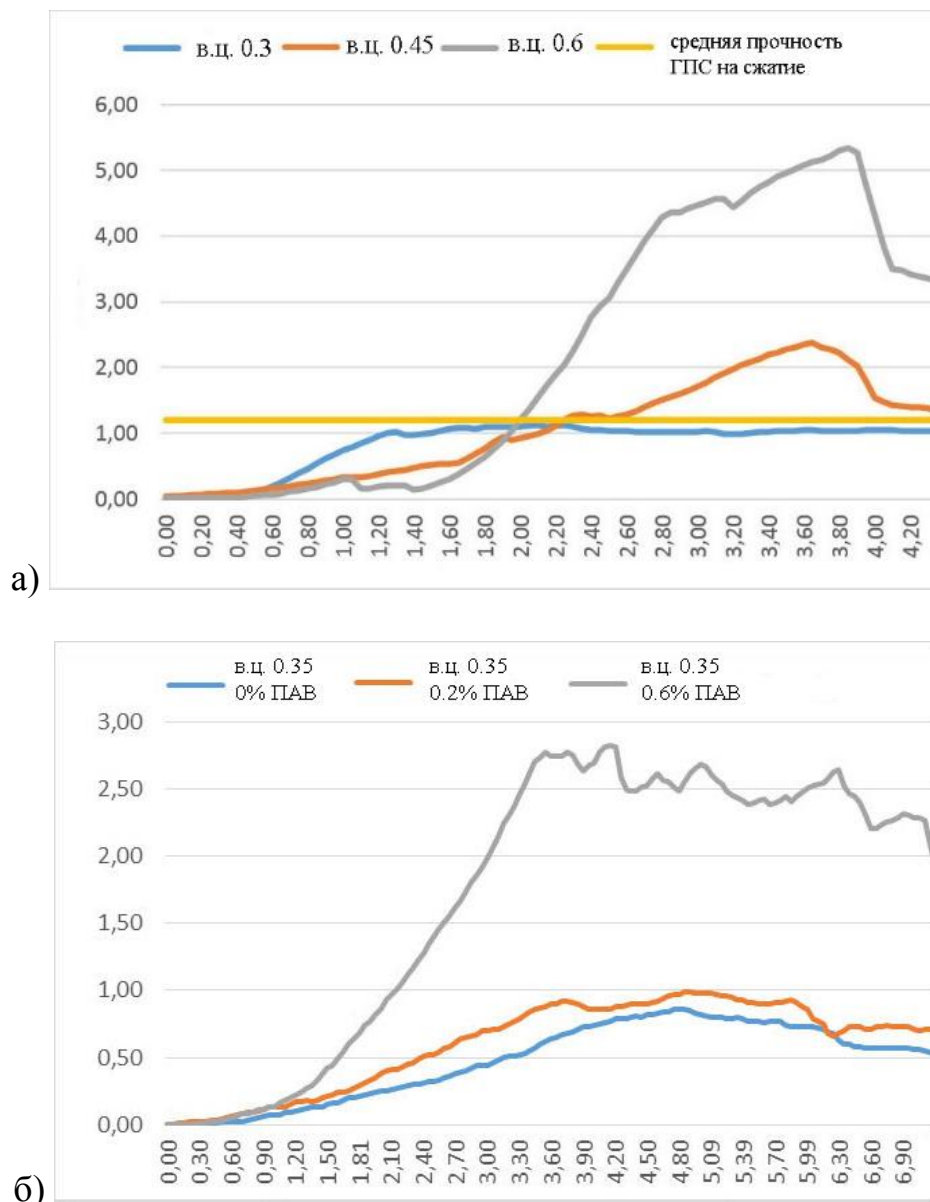


Рисунок 3.16 – Зависимость деформации ГПС-бетона от напряжения, а – при различном В/Ц; б – при постоянном В/Ц и различном содержании ППАВ.

Таким образом, итоговая рецептура композита при плотности 700 кг/м^3 : расход цемента 300 кг/м^3 , соотношение крупной фракции ГПС к мелкой, %: 60/40, За крупную фракцию ГПС принимают смесь фракционного размера 2,5 – 5,0 мм, за мелкую фракцию: 0,16-2,5 мм. Фракционный состав смеси гранул мелкой фракции составляет, масс. %: 0,16-0,63 мм – 12,5, 0,63-1,25 мм – 25, 1,25-2,5 мм – 62,5. Водоцементное отношение составляет 0,6. При введении 0,6% добавки ППАВ от массы цемента удалось сократить водоцементное отношение до 0,55 и повысить итоговую прочность композита на 10%.

Макрофотография скола образца ГПС-бетона разработанного состава после его испытания на сжатие приведена на рисунке на рисунке 3.18 «а». Как видно, разрушение проходит по наиболее слабым участкам композита – гранулам заполнителя. Отсутствие цельных гранул на поверхности скола образца говорит о надежности связи заполнитель – цементный камень при данных параметрах рецептуры композита. Высокая подвижность цементной пасты обеспечивает прочную адгезионную связь развитой шероховатой поверхности заполнителя с цементной матрицей. На рисунках 3.17 «б» и «в» представлена микроскопия структуры ГПС-бетона разработанного состава после его испытания на сжатие, по которой видно, что цементный камень проникает в открытые внешние ячейки гранулы ГПС, повышая прочность сцепления заполнителя с цементной матрицей. По рисунку 3.18 «в» можно судить об отсутствии слабых кристаллических образований портландита (Ca(OH)_2) на границе раздела фаз. Гидрооксид кальция, как правило, образуется в следствие повышенного содержания воды на поверхности плотных заполнителей. Вероятно, пористые заполнители поглощают воду наружными открытыми порами и отдают ее в дальнейшем при гидратации цемента, в следствие чего переходная зона характеризуется более однородным и прочным C-S-H гелем.

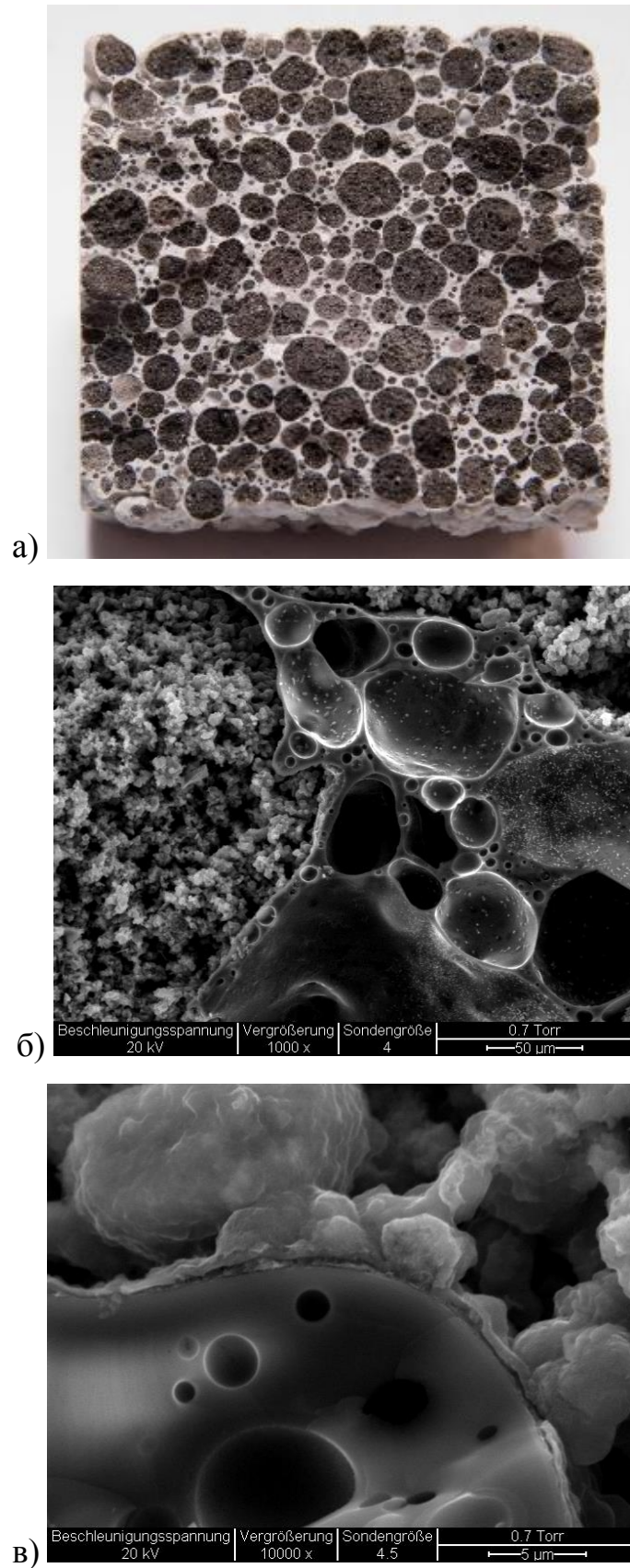


Рисунок 3.17 – а – Фотография поверхности скола ГПС-бетона; б, в – Микроскопия зоны контакта заполнителя с цементной матрицей

Итоговая плотность разработанного бетона изменяется при варьировании содержания цемента. На рисунке 3.18 приведена зависимость прочности ГПС-бетона от его плотности. При плотности 400 – 800 кг/м³ прочность бетона составляет 2 – 6 МПа. Водоцементное отношение корректировалось в зависимости от содержания цемента. В таблице 3.10 приведены итоговые составы ГПС бетона. При расходе цемента от 120 до 440 кг/м³ водоцементное отношение составляло от 0,83 до 0,52 при применении ППАВ от массы цемента.

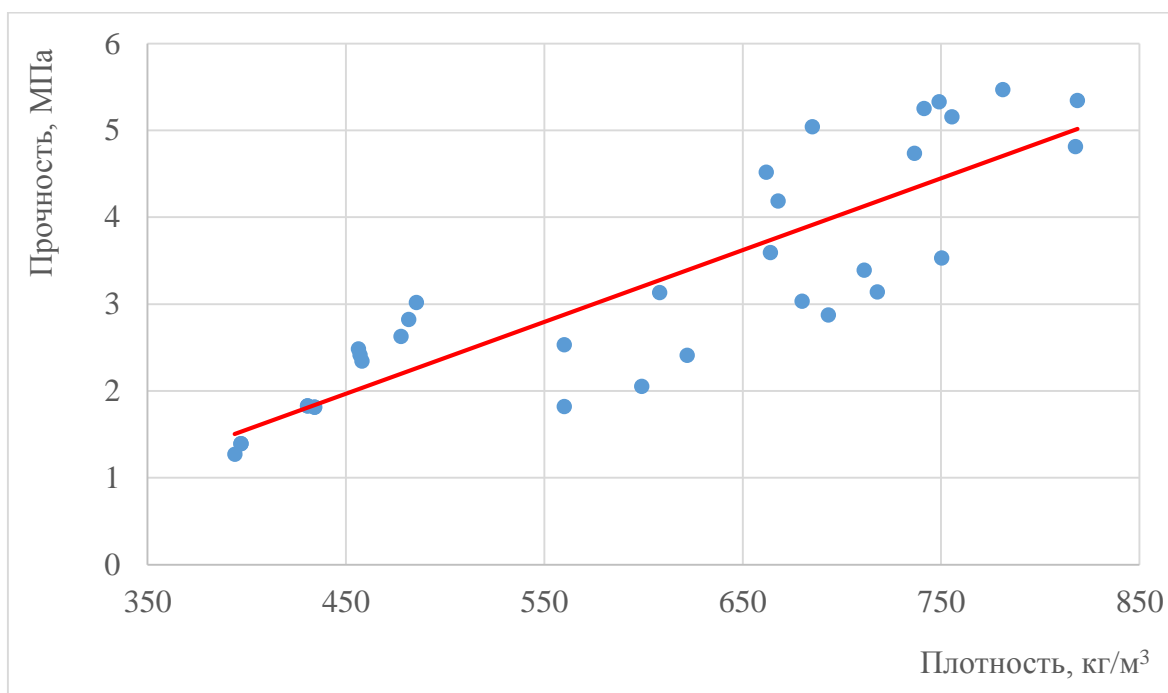


Рисунок 3.18 – Зависимость прочности ГПС-бетона от плотности.

Таким образом, в результате подбора состава был подобран состав ГПС-бетона класса по плотности D 400 – D 800 и класса по прочности B 1,5 – B 5. При полученных параметрах рецептуры композита обеспечивается прочная адгезионная связь развитой шероховатой поверхности заполнителя с цементной матрицей и достижение наилучших прочностных характеристик композита в целом.

Таблица 3.10 – Свойства разработанного ГПС-бетона

Класс бетона по плотности	Состав бетона, кг/м ³			Прочность на сжатие, МПа	Теплопроводность в сух. сост., Вт/м·К
	ГПС	Цемент	В/Ц		
D 400	180	120	0,83	2,4	0,09
D 500	170	200	0,65	3,6	0,11
D 600	160	280	0,57	4,4	0,13
D 700	140	360	0,55	4,9	0,14
D 800	130	440	0,52	5,5	0,15

3.5 Испытания на расширение бетонных балочек (испытания № 3 и № 4)

Для прохождения испытания на расширение бетонных балочек № 3 и № 4 применялся подобранный состав ГПС-бетона плотностью 700 кг/м³. Соотношение крупной фракции ГСП к мелкой, %: 60/40, за крупную фракцию ГПС принималась смесь фракционного размера 2,5 – 5,0 мм, за мелкую фракцию: 0,16-2,5 мм. Фракционный состав смеси гранул мелкой фракции составляет, масс. %: 0,16-0,63 мм – 12,5, 0,63-1,25 мм – 25, 1,25-2,5 мм – 62,5. Водоцементное отношение составляло 0,6. ППАВ был исключен из составов испытываемых образцов ввиду его возможного влияния на протекание ЩСР.

На первом этапе испытания проводился ускоренный эксперимент в течение 14-ти суток. Для проведения эксперимента с торцов к изготовленным балочкам встраивались анкерные элементы для измерения относительных расширений образцов. После суточного твердения в условиях 100% влажности балочки расплубливались и следующие 24 часа находились в дистиллированной воде при температуре 80° С. После этого балочки извлекались и измерялись. Полученные данные фиксировались как начало отсчета измерения. Далее две балочки из каждого состава погружались в 1М раствор NaOH, а одна балочка каждого состава

- в дистиллированную воду. Балочки помещались обратно в температурную камеру и хранились 14 суток при температуре 80° С. Каждый день фиксировалось изменение их длины. Согласно методике, заполнитель считается нереакционноспособным, если относительное удлинение образца бетона в ходе испытаний за 14 суток не превысит 0,1%, при условии, что последний результат испытания отличается от трех предшествующих результатов измерений не более чем на 15 %. Для обеспечения точности результатов эксперимент проводился дважды.

На рисунке 3.19 представлены результаты 14-дневного теста образца ГПС-бетона. Для изготовления образца использовался цемент с содержанием $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$. Расширение балочки составило 0,055%, что ниже допустимого предела в 0,1 %. Согласно методике, в этом случае заполнитель считается нереакционноспособным. Однако, как видно, последние фазы кривых расширения ГПС-бетона к 14-суточному сроку не имеют затухающий характер, последний результат испытания отличается от трех предшествующих результатов измерений более чем на 15 %. Вероятно, это означает, что протекание щелочной коррозии в легких бетонах на основе ГПС требует больше времени для завершения. Поэтому продолжительность эксперимента была увеличена в два раза. К 28 суткам расширения образцов приближается к 0,1% (рисунок 3.20). На начальном этапе невысокие расширения образцов могут быть объяснены размещением продуктов реакции в поровом пространстве заполнителя. Со временем объем силикатного геля возрастает, он начинает заполнять мелкие поры и пустоты, что приводит к увеличению значений относительных расширений.

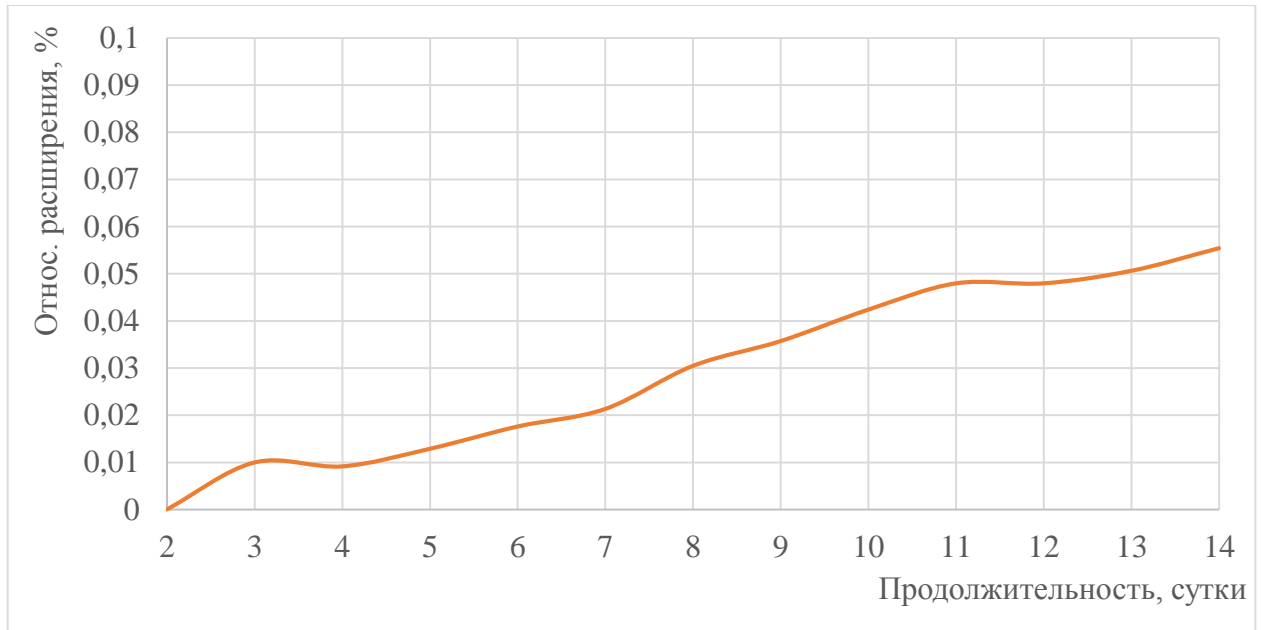


Рисунок 3.19 – Испытание образца ГПС-бетона с помощью ускоренного теста на расширение бетонных балочек в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 14 суток.

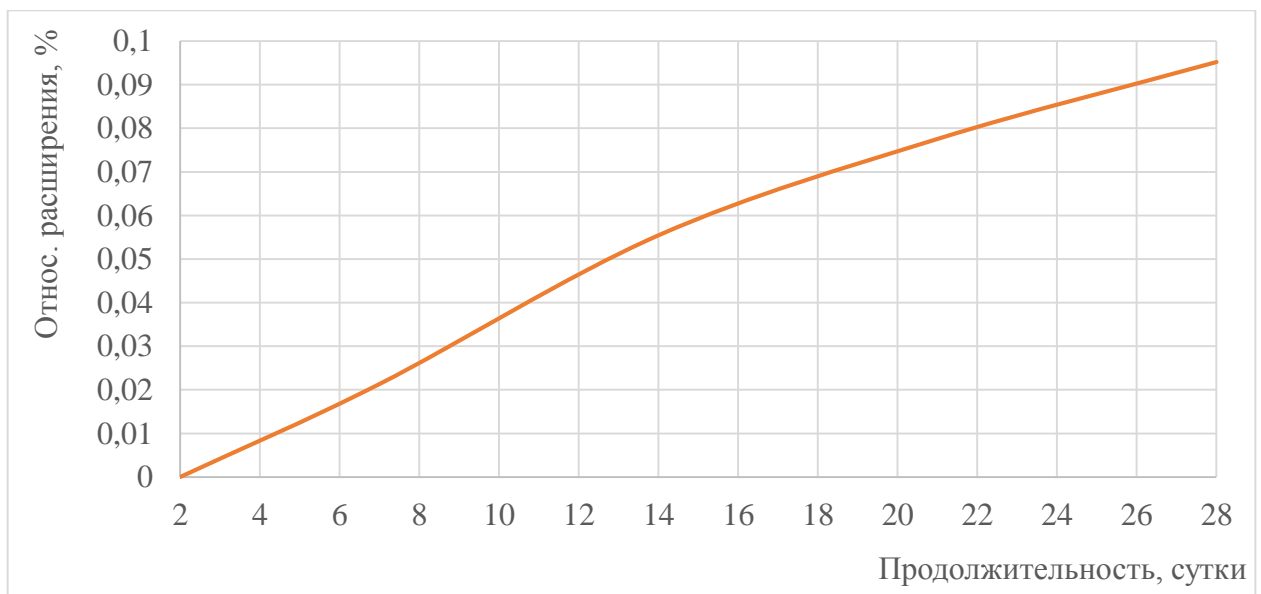


Рисунок 3.20 – Испытание образца ГПС-бетона с помощью ускоренного теста на расширение бетонных балочек в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 28 суток.

В данной работе расширения балочек, выдержанных в 1М растворе NaOH при температуре 80° С, сравнивались с расширениями балочек, выдержанных в дистиллированной воде при той же температуре. По сравнению с относительными

расширениями балочек, выдержанных в 1М растворе NaOH, относительные расширения образцов, выдержанных в дистиллированной воде сократились с 0,055% до 0,025% (рисунок 3.21). Таким образом, относительные расширения образцов наблюдаются в том числе и при их выдерживании в бесщелочных растворах. Как уже было доказано, при взаимодействии ГПС с раствором ионы натрия и гидроксид ионы могут переходить с поверхности заполнителя в «поровый раствор» бетона и далее взаимодействовать с кремнеземом заполнителя, вызывая ЩСР даже в отсутствие щелочей в изначальном растворе.

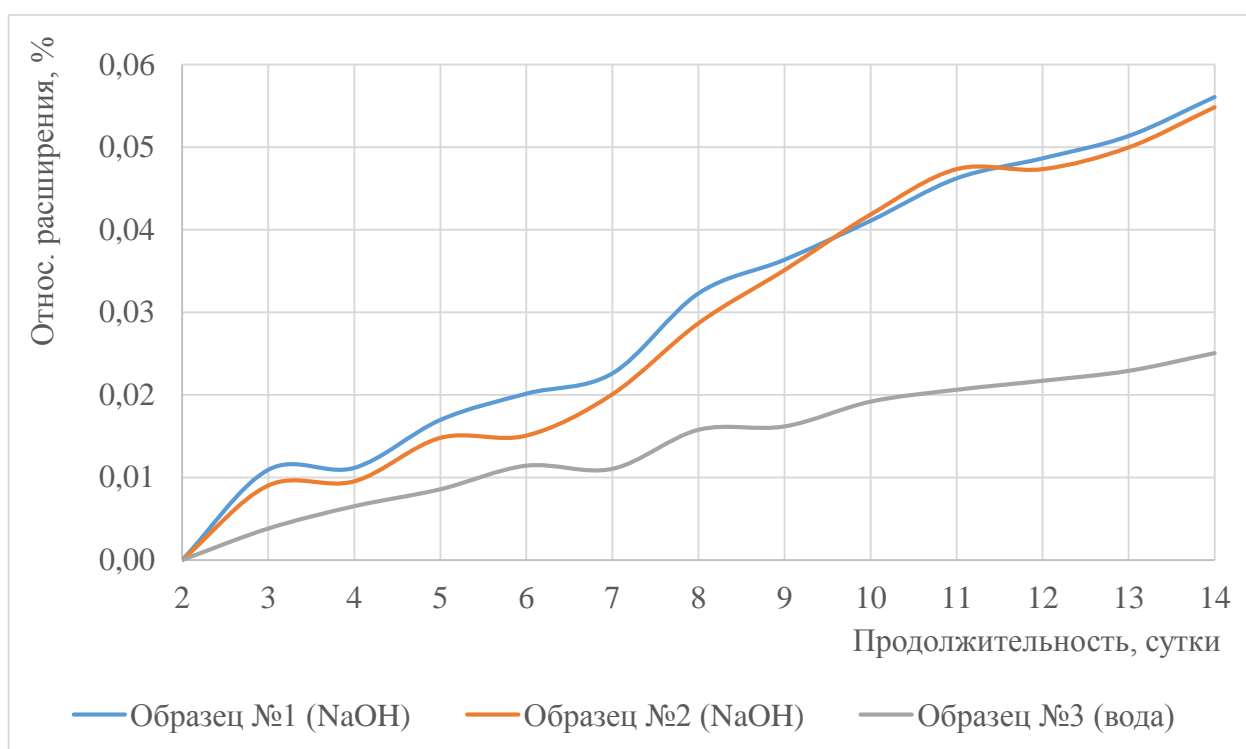


Рисунок 3.21 – Расширения образцов ГПС-бетона (содержание щелочей в цементе: $\text{Na}_2\text{O}_e=0,86$), выдержанных в 1М растворе NaOH (№1, №2) и образца, выдержанного в дистиллированной воде (№3) при температуре 80° С.

Ускоренное испытание на выдерживание образцов в 1М растворе NaOH в течение 14 суток имитировало условия эксплуатации бетона, обеспечивающие обильный контакт композита с щелочами внешней среды. Как показали результаты экспериментов, значения расширений образцов на основе ГПС составило менее 0,1%. Согласно разработанной методике это означает, что заполнитель считается

нереакционноспособным. Однако стоит отметить, что последний результат испытания отличается от трех предшествующих результатов измерений более чем на 15 %, что говорит о необходимости проведения дополнительных исследований. Поэтому в работе проводилось дополнительное ускоренное исследование - более приближенное к реальным условиям эксплуатации бетона годовое испытание балочек на расширение № 4, согласно которой образцы выдерживались в течение одного года при 40° С и 100% относительной влажности.

Состав образцов соответствовал составу, примененному при испытании № 3. Образцы изготавливались и распалубливались после 48 часов твердения в условиях 100% влажности. Следующие 24 часа они находились в климатической камере при температуре 40° С и 100% влажности. После этого балочки извлекались и измерялись. Полученные данные фиксировались как начало отсчета измерения. Далее балочки помещались обратно в климатическую камеру. Последующие замеры проводили ежемесячно в один и тот же день в течение одного года с момента изготовления образцов. Перед замером образцы охлаждались до комнатной температуры в течение 16 часов. Между замерами образцы хранили в климатической камере при температуре 40° С и 100% влажности. Согласно методике, если по истечению одного года относительное удлинение образцов каждого испытания не превысит 0,04 %, то заполнитель считается нереакционноспособным.

Согласно приведенным на рисунке 3.22 результатам относительные расширения испытываемых образцов не превысили допустимый предел в 0,04% и составили 0,035%. На рисунке 3.23 представлены результаты относительных изменений длины образцов, выдержанных в течение одного года при нормальных условиях: температуре 20±2° С и относительной влажности 65%. В данных условиях образцы показали обратное значение расширений – усадку в 0,96%.

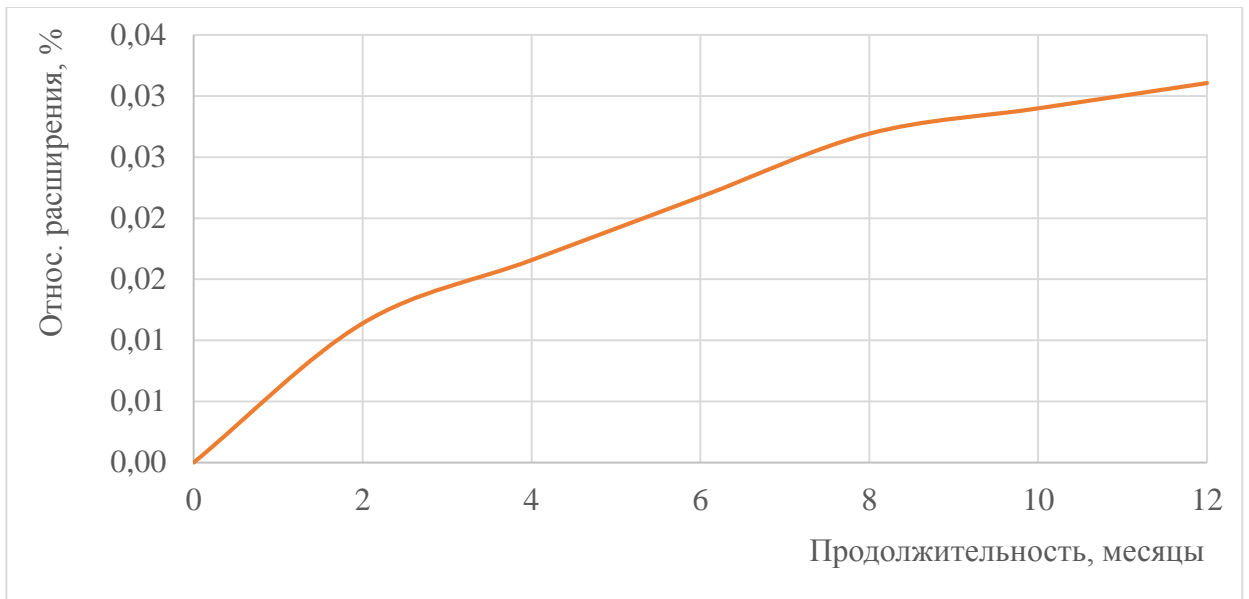


Рисунок 3.22 – Расширения образцов ГПС-бетона после экспозиции в климатической камере при 40° С и 100% относительной влажности в течение одного года.

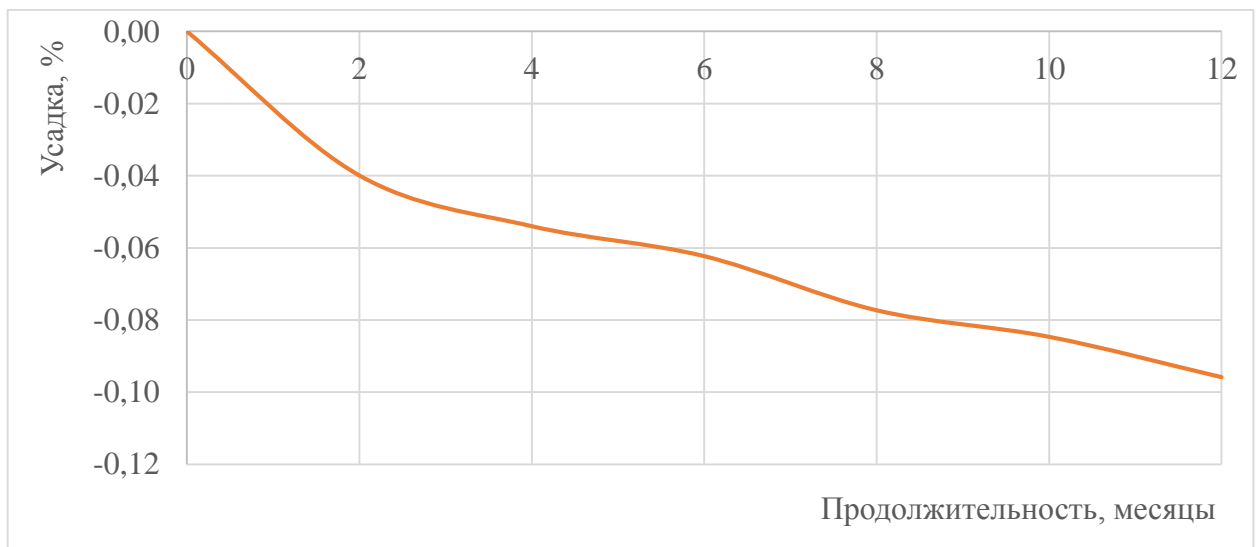


Рисунок 3.23 – Усадка ГПС-бетона после выдерживания при нормальных условиях: температуре 20±2 °С и относительной влажности 65% в течение одного года.

В работе исследовалась зависимость интенсивности протекания ЩСР в ГПС-бетонах от фракционного размера ГПС. Для этого образцы бетона, в которых использовалось ГПС различного фракционного размера, проходили ускоренное

испытание № 3 и № 4. Применялись 3 состава ГПС-бетона с применением смесей ГПС фракционного размера 0,16 – 5 мм, а также фракций ГПС 0,315 – 0,5 мм и 1,0 – 1,5 мм. На рисунке 3.24 представлены результаты 14-дневного теста на выдерживание образцов ГПС-бетона в 1М растворе NaOH при 80° С. Расширения образца контрольного состава составили 0,055%. При применении мелкой фракции ГПС 0,315 – 0,5 мм расширения увеличились до 0,083%. При применении фракции ГПС 1,0 – 1,5 мм расширения образцов превысили допустимые методикой значения в 0,1% и составили 0,18%.

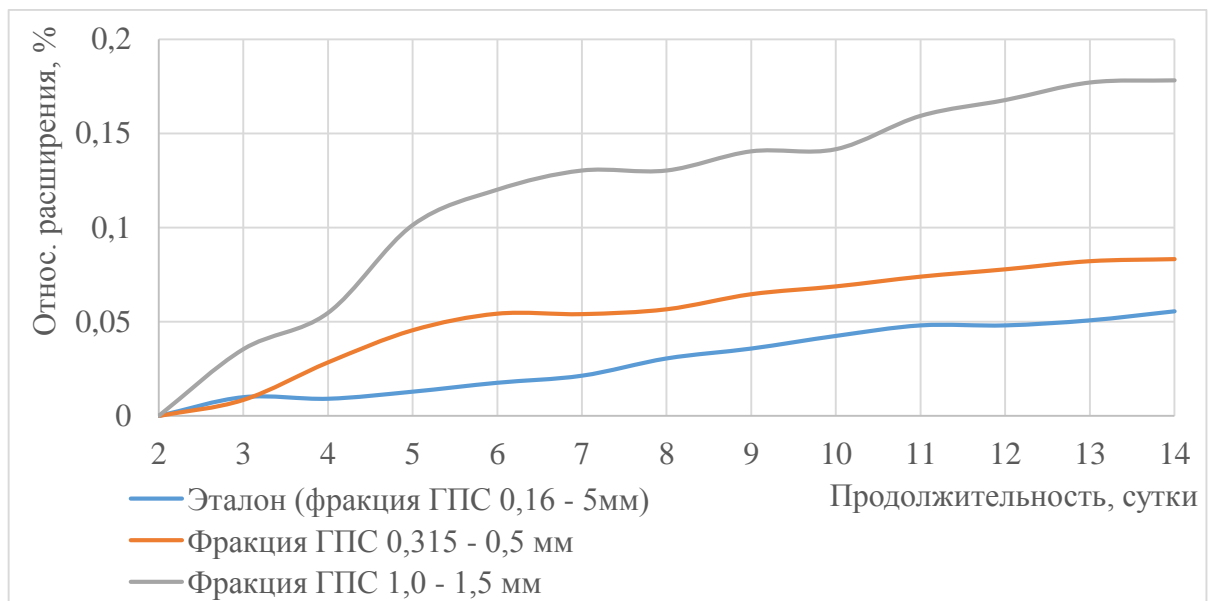


Рисунок 3.24 – Испытание образцов ГПС-бетона на расширение с применением различных фракций ГПС (0,16 – 5 мм, 0,315 – 0,5 мм, 1,0 – 1,5 мм) в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 14 суток.

Фракция ГПС 1,0 - 1,5 мм в связи с превышением допустимого предела на расширение в испытании № 3 была исключена для дальнейшего исследования. В работе образцы ГПС-бетона с применением фракций 0,315 - 0,5 мм проходили испытание № 4. Как видно из рисунка 5.25, относительное расширение образца ГПС-бетона после прохождения испытания составило 0,024.

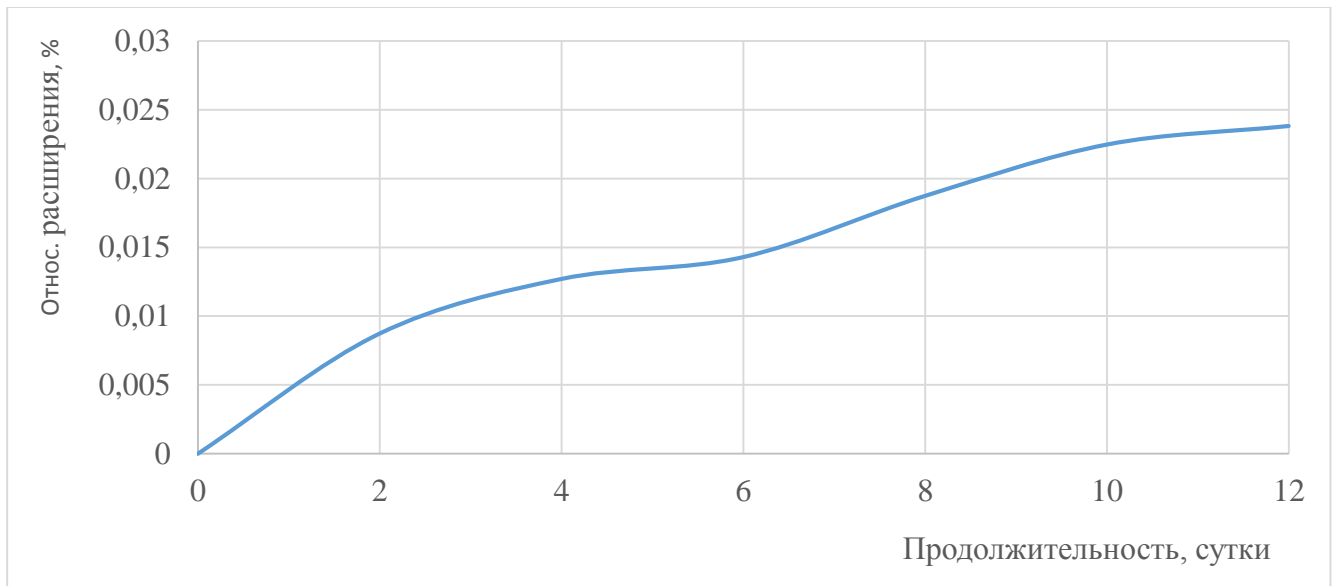


Рисунок 3.25 – Расширения образцов ГПС-бетона, содержащего фракцию ГПС 0,315 – 0,5 мм

Таким образом, в работе образцы ГПС-бетона прошли ускоренные испытания на расширение бетонных балочек № 3 (выдерживание образцов в 1М растворе NaOH при температуре 80 °С в течение 14-суток) и № 4 (выдерживание образцов при 40 °С и 100% относительной влажности в течение одного года). Условия проведения ускоренных испытаний симулируют эксплуатацию бетона при различных условиях. Относительные расширения образцов являются количественной характеристикой проявления ЩСР в ГПС-бетоне, степень протекания которой, согласно проведенным исследованиям, зависит от условий эксплуатации бетона. По сравнению с наиболее приближенным к реальным условия эксплуатации испытанием № 4, в условиях обильного доступа щелочей из внешней среды (испытание № 3) риск разрушений композита вследствие ЩСР возрастает. Испытание образцов бетона в дистиллированной воде показывают, также, необходимость ограничение контакта бетона с водой при эксплуатации. В свою очередь, в образцах, в которых протекание химических процессов не ускорялось посредством выдерживания в климатической камере, отмечаются обратные значения расширений. Усадка свойственна большинству легких бетонов и способна компенсировать внутренние напряжения от расширения бетона

вследствие ЩСР. Поэтому при использовании ГПС-бетона в благоприятных условиях (внутренних стенах и перегородках зданий и сооружений) риск негативного протекания ЩСР минимален.

Степень протекания ЩСР также зависит от применяемого гранулометрического состава заполнителя. Так, при преобладании в составе фракций 1,0 – 1,5 мм наблюдается выраженный эффект pessimuma, что говорит о необходимости сокращения данной фракции в составе бетона. В свою очередь, использованные смеси ГПС 0,16 – 5,00 мм и 0,315 – 0,5 мм пригодны для использования в цементных композитах. Смесь ГПС 0,16 – 5,00 мм может применяться для производства легких теплоизоляционно-конструкционных бетонов, смесь ГПС 0,315 – 0,5 мм пригодны для получения теплоизоляционных штукатурных и кладочных смесей.

3.6 Микроструктурные исследования образцов после прохождения испытаний

Для проверки адекватности полученных в ходе проведения ускоренных испытаний на расширение бетонных балочек данных в работе проводились дополнительные микроструктурные исследования образцов после прохождения испытания. На рисунке 3.26 представлена микроскопия структуры ГПС-бетона после прохождения ускоренного теста на расширение бетонных балочек в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 14 суток. Несмотря на то, что расширения образцов не превысило допустимый предел в 0,1%, отмечается сильное нарушение структуры и обильное трещинообразование в гранулах заполнителя по причине ЩСР (рисунок 3.26 «а»). Деструктивные процессы прошли не только на поверхности ГПС, но и на внутренних стенках гранулы (Рисунок 3.26 «в»). Присутствуют трещины и отслоения вдоль границы раздела фаз «заполнитель - цементный камень» (рисунок 3.26 «е»). Однако контакт большинства гранул с

матрицей продолжает осуществляться через слой щелоче-силикатного геля, толщина которого составляет порядка 10-20 мкм (рисунок 3.26 «а», «б»). Структура поверхности внутренних стенок гранул претерпела значительные изменения (рисунок 3.26 «г»). Судя по внешнему виду матрицы пеностекла, аморфный оксид кремния изначального заполнителя в процессе взаимодействия с щелочами практически полностью преобразовался в слабоосновные гелевидные гидросиликаты кальция, которые при высыхании образцов после эксперимента проявили усадочные трещины. Типичные продукты реакции различной морфологии и состава можно наблюдать в порах ГПС (рисунок 3.26 «б»), которые, по сравнению с первоначальным химическим составом пеностекла, характеризуется повышенным содержанием натрия, магния и кальция, а также меньшим содержанием кремния по сравнению с изначальным ГПС (таблица 3.11). Энерго-дисперсионная спектрограмма гранул после его экспозиции в щелочном растворе зафиксировала изменения в химическом составе ГПС, а именно повышение содержания кальция и более низкое содержание кремния по сравнению с химическим составом ГПС до испытания. Данные изменения химического состава в различной степени наблюдаются по всему объему гранул. Основная часть аморфного оксида кремния заполнителя в процессе взаимодействия со щелочами практически полностью преобразовалась в низкоосновные гелевидные гидросиликаты кальция, которые при высыхании образцов после эксперимента проявили усадочные трещины.

На рисунке 3.27 представлена микроскопия структуры ГПС-бетона после выдерживания бетонных балочек в дистиллированной воде при 80° С в течение 14 суток. Как видно, на поверхности пор заполнителя наблюдаются новообразования силикатного гидрогеля, имеющие глобулярную и дендритную структуру. При этом деструкции заполнителя в основном происходят по порам стенок гранулы под действием структурных преобразований. Таким образом, микроструктурные исследования образцов доказывают возможность протекания ЩСР при контакте

ГПС-бетона с водой, степень которой ограничена количеством ионов щелочных соединений, диссоциирующих с поверхности заполнителя.

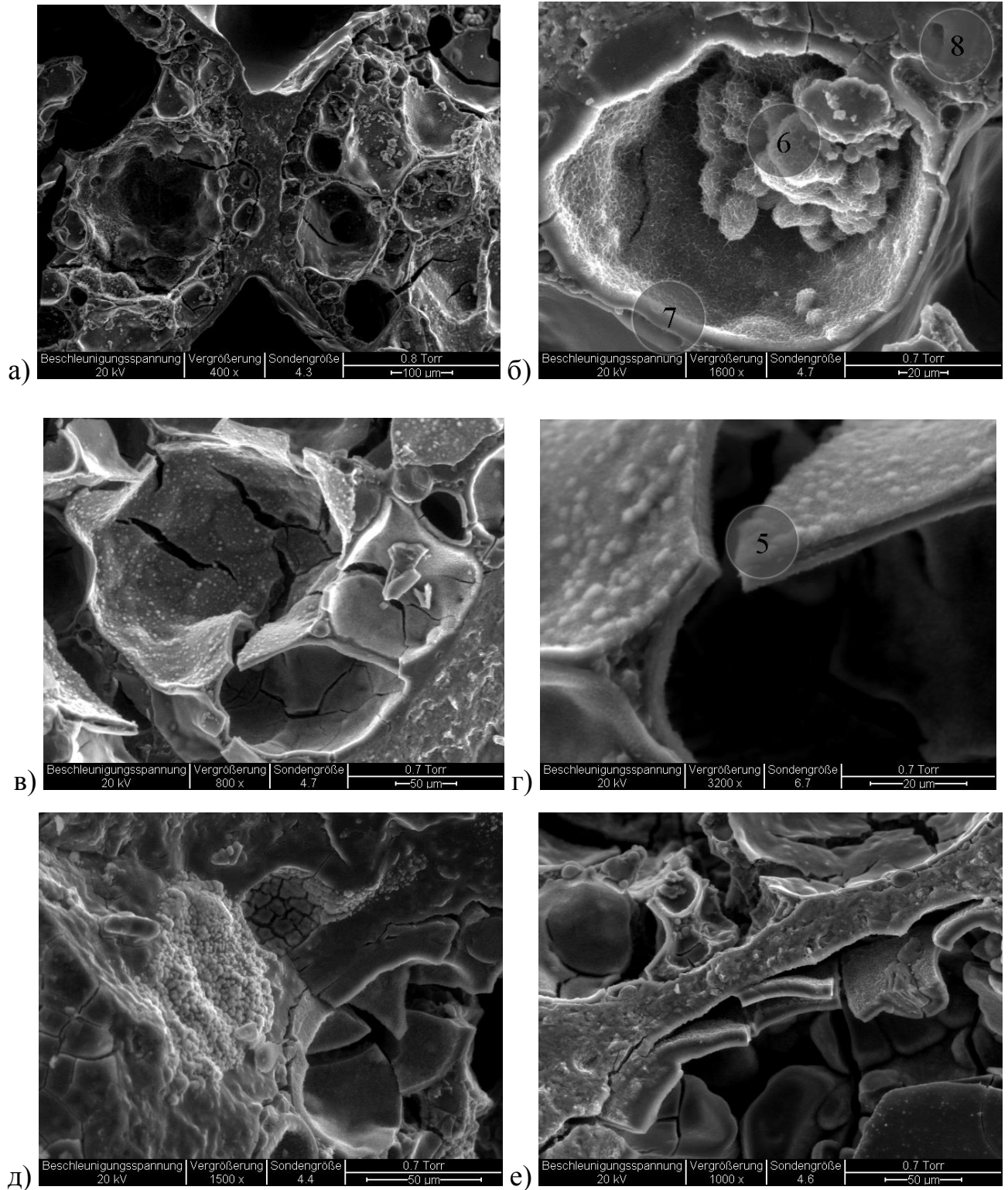


Рисунок 3.26 – Микроскопия структуры ГПС бетона после 28-суточной экспозиции в 1М растворе NaOH при 80 °С.

На рисунке 3.28 «а», «б» представлена микроскопия образца ГПС-бетона в возрасте 28 суток, выдержанного при нормальных условиях: температуре $20\pm 2^\circ\text{C}$ и 65% относительной влажности. В отличие от образцов, прошедших экспозицию в щелочах, внутренние ячейки данных образцов являются целыми, без видимых продуктов или следов ЩСР. Матрица композита также имеет целостную структуру, а в переходной межфазной зоне не наблюдается отслоений и дефектов. Гранулы имеют прочное сцепление с цементным камнем. На рисунке 3.28 «в», «г», «д», «е» представлена микроскопия образца ГПС-бетона выдержанного при температуре $20\pm 2^\circ\text{C}$ и 65% относительной влажности в течение трех лет. Как видно, по истечению длительного времени в теле бетона также не наблюдается серьезных структурных разрушений. Цементная матрица данного образца в отличие от структуры бетона после прохождения ускоренного испытания некомпактна, богата порами и имеет соответствующий С-S-H фазе вид. При этом, по сравнению с образцом, прошедшим экспозицию в щелочном растворе при высоких температурах, содержание щелочей в цементном камне сократилось на 70%. По состоянию переходной зоны можно судить о прочной связи заполнителя с цементной матрицей.

На рисунке 3.29 представлена микроскопия образца ГПС-бетона, выдержанного в климатической камере при 40°C и 100 % относительной влажности в течение года (испытание № 4). Как видно, после прохождения испытания структура заполнителя имеет схожий характер разрушения с образцами после прохождения испытания № 3, однако степень деструкции заполнителя и объем образованного силикатного гидрогеля значительно снижается. Как видно, силикатный гидрогель формируется и распределяется в поровом пространстве заполнителя. При этом поровая структура заполнителя способна вместить в себя весь объем образованных в ходе протекания ЩСР продуктов реакции.

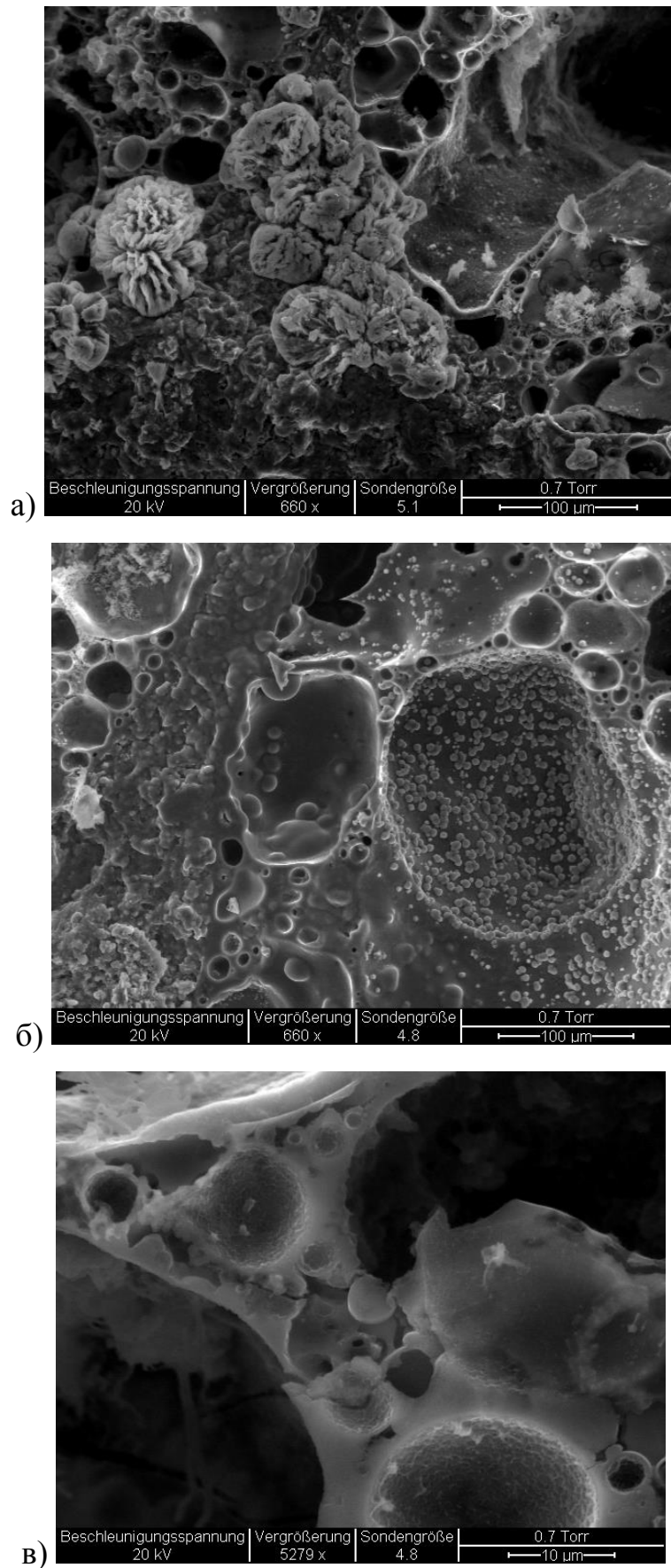


Рисунок 3.27 – Микроскопия структуры бездобавочного ГПС-бетона после 14-суточной экспозиции в дистиллированной воде при 80 °С.

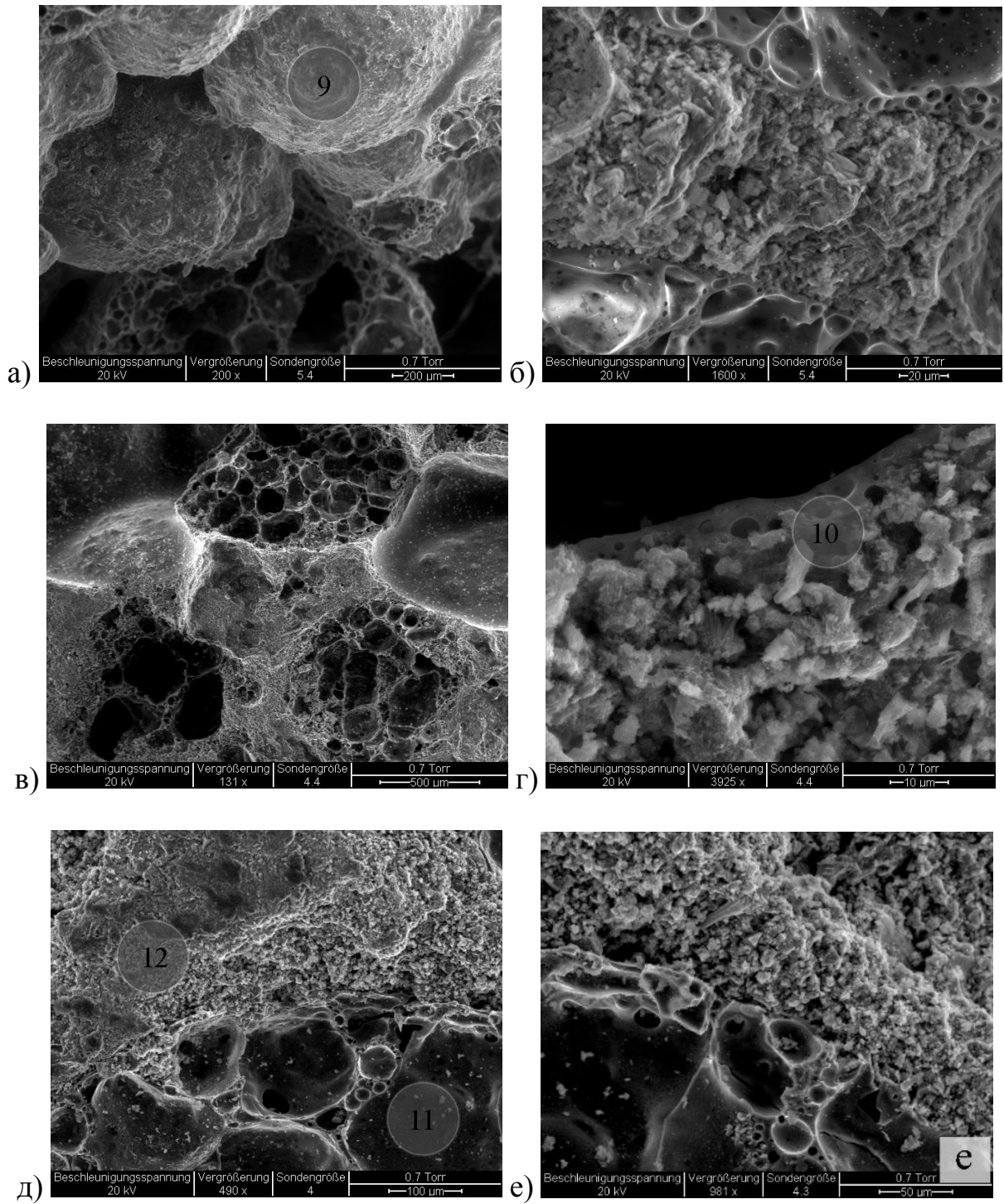


Рисунок 3.28 – Микроскопия образца ГПС-бетона, выдержанного при температуре $20 \pm 2^\circ \text{C}$ и 65% относительной влажности, а, б – в течение 1 месяца, в, г, д, е – в течение трех лет.

Таблица 3.11 – Локальный энерго-дисперсионный элементный химический анализ

№ спектра	Источник	Содержание элемента, %.								
		C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca
5	Рис. 3.26 «г»	1,17	60,00	7,46	0,72	0,44	12,96	0,41	0,23	16,61
6	Рис. 3.26 «б»	1,07	55,27	9,29	0,85	0,74	12,83	0,39	0,25	19,16
7	Рис. 3.26 «б»	1,01	55,70	11,03	2,46	0,60	16,02	0,57	0,27	12,10
8	Рис. 3.26 «б»	0,86	48,94	4,71	0,46	1,37	11,45	0,75	0,16	30,09
9	Рис. 3.28 «а»	7,18	49,29	2,28	0,79	6,11	7,98	0,64	0,85	22,79
10	Рис. 3.28 «г»	6,15	58,92	1,55	0,54	0,81	9,47	0,25	0,29	21,45
11	Рис. 3.28 «д»	5,98	50,40	3,56	0,91	0,91	25,39	0,39	0,50	10,53
12	Рис. 3.28 «д»	8,57	57,92	1,44	0,51	0,91	5,40	0,53	0,27	23,90

На рисунке 3.30 представлена микроскопия образца ГПС-бетона после экспозиции в климатической камере и после выдерживания при нормальных условиях температуре 20° по Цельсию и относительной влажности 60%. Как видно, ускорение химических процессов при выдерживании образцов при температуре 40° по Цельсию и относительной влажности 100% (условиях климатической камеры) ведет к ускорению протекания химических процессов в теле бетона и большим различиям между состоянием структуры экспонированного и неэкспонированного образцов.

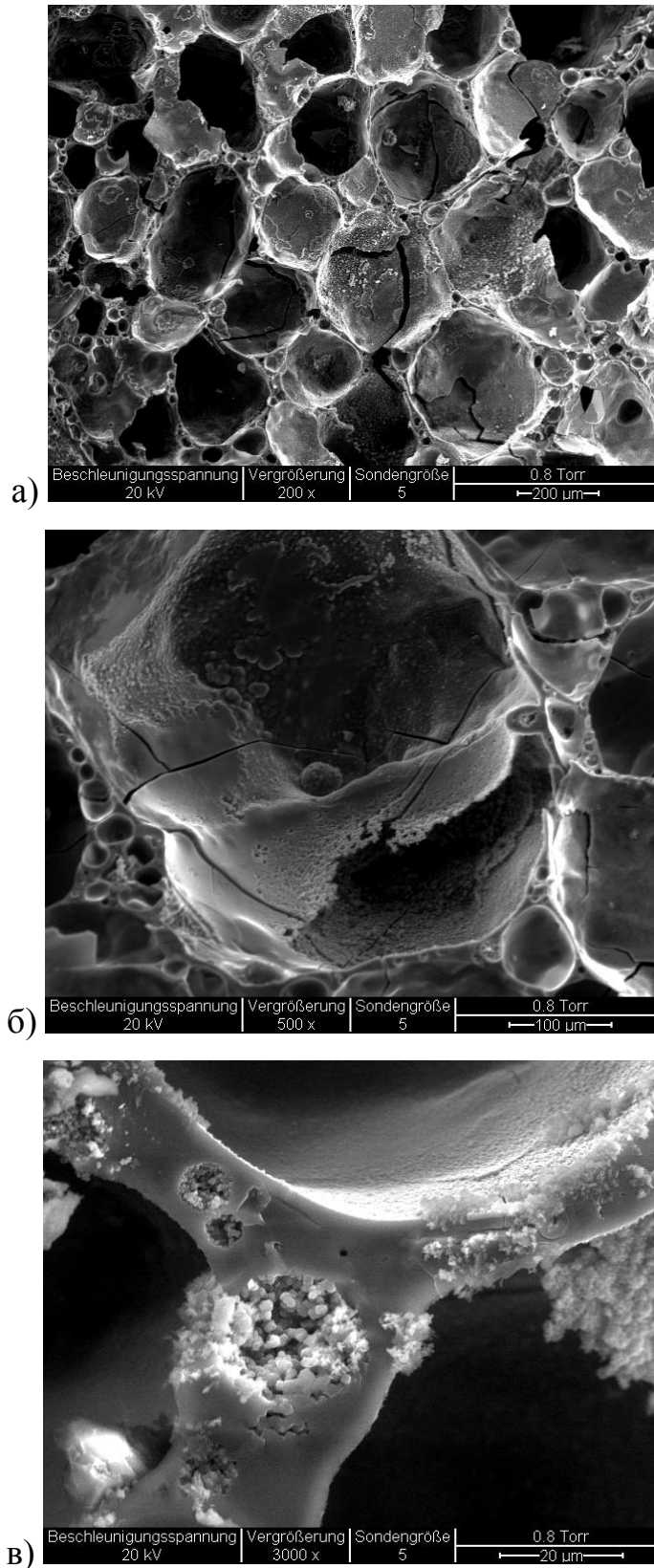


Рисунок 3.29 – Микроскопия образца ГПС-бетона после годовой экспозиции в климатической камере при температуре 40° С и относительной влажности 100%.

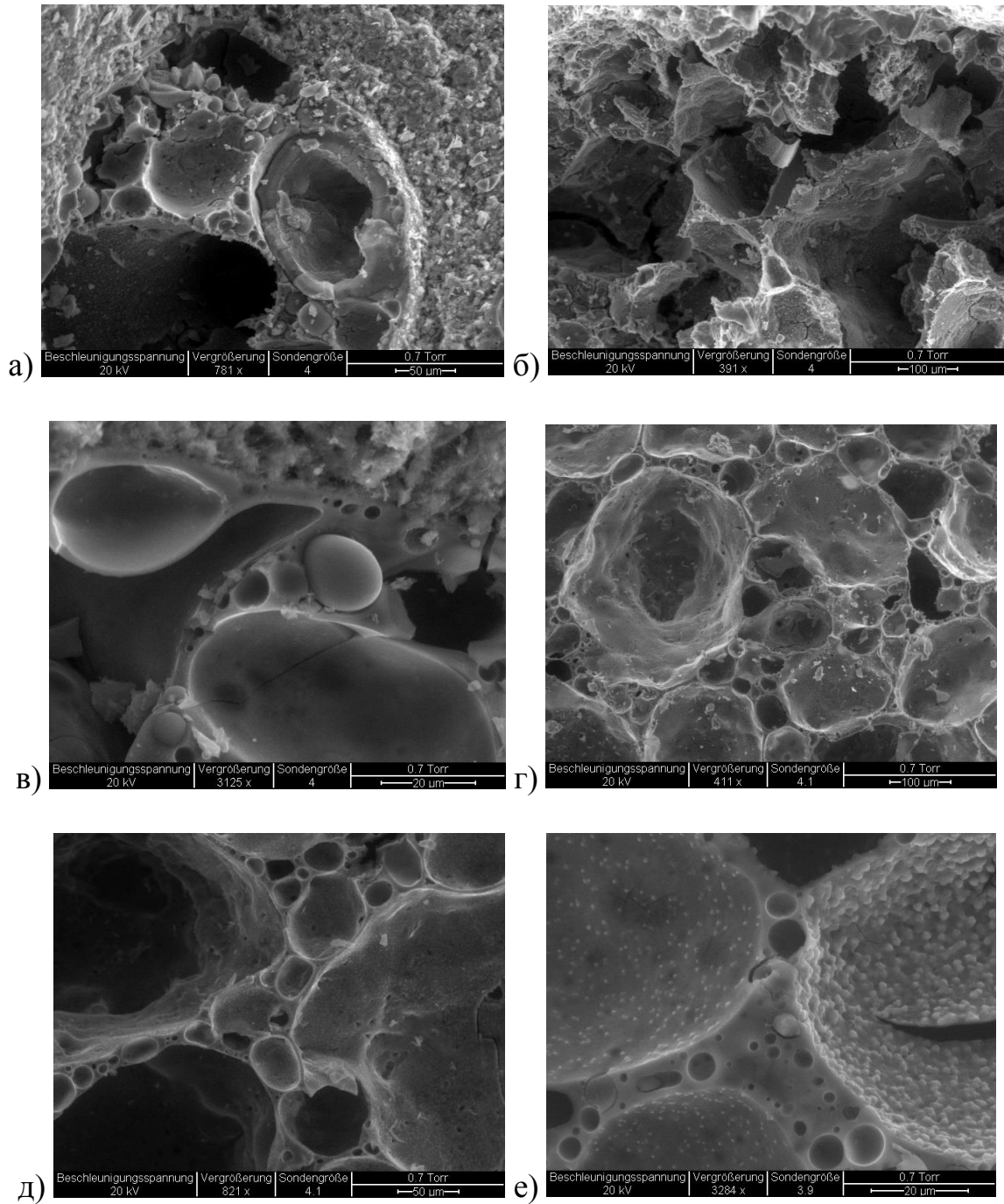


Рисунок 3.30 – Результаты микроструктурного исследования образца ГПС-бетона: а, б, в – после годовой экспозиции в климатической камере; г, д, е – после выдерживания при нормальных условиях температуре 20°C и относительной влажности 60%.

На рисунке 3.31 представлены макрофотографии двух образцов, хранившихся лабораторных условиях при 20 °C и 60 % относительной влажности, а также под

открытым небом в течение одного года. Как видно, по сравнению с образцом, изолированным от условий внешней окружающей среды (рисунок 3.31 «а» и «б»), подвергшийся неблагоприятным атмосферным явлениям образец (рисунок 3.31 «в» и «г») показал значительные деструкции заполнителя. Из снимков, сделанных сканирующим электронным микроскопом (рисунок 3.32 «а», «б», «в») видно, что он получил локальные разрушения, схожие с разрушениями заполнителя в образцах после выдерживания в климатической камере при температуре 40 °С и влажности 100%. Таким образом, результаты, полученные с помощью испытания № 4 коррелируют с натурными испытаниями образцов, что подтверждает адекватность полученных данных.

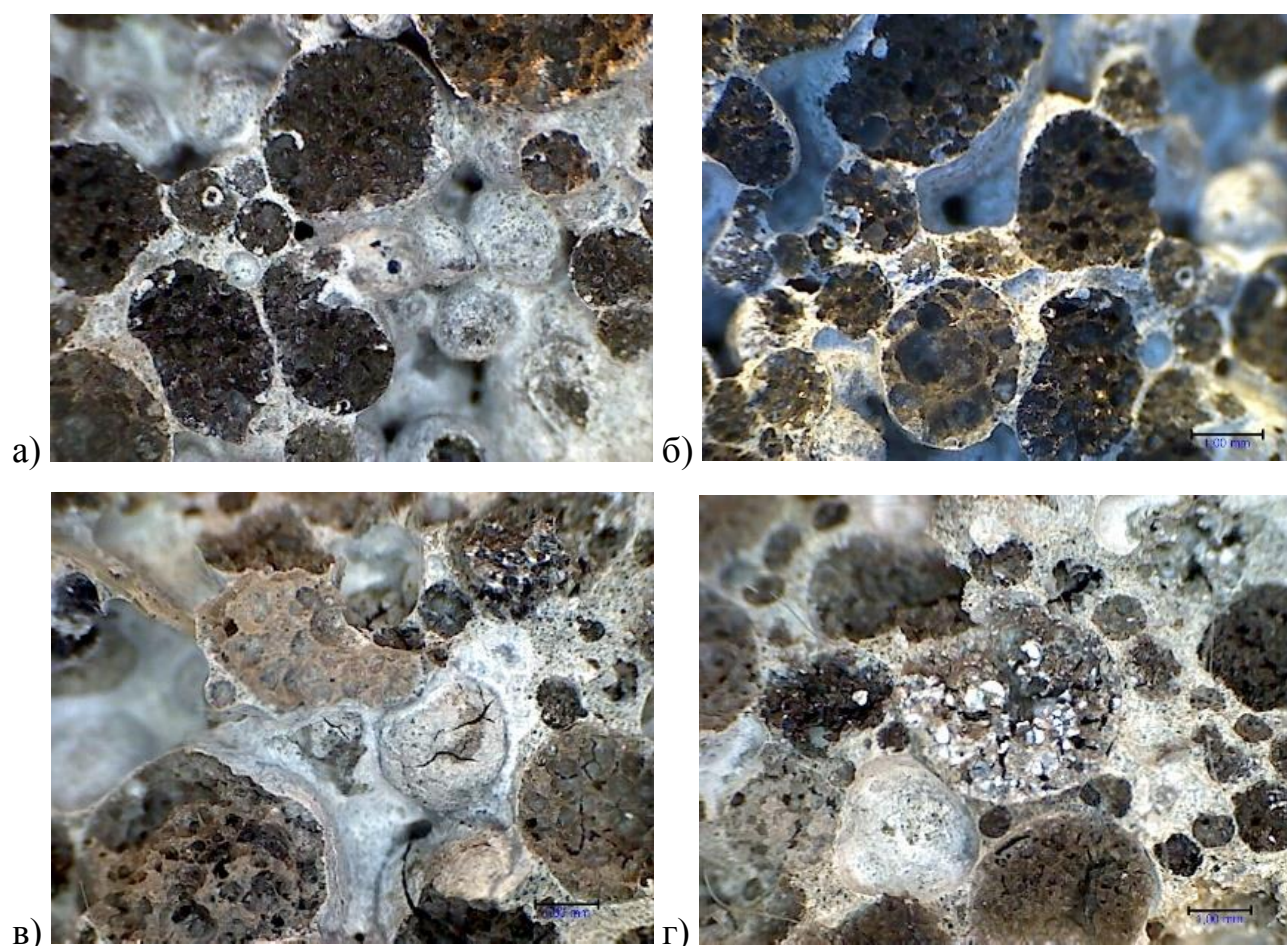


Рисунок 3.31 – Макрофотография образца ГПС-бетона после выдерживания течение трех лет: а, б – в лабораторных условиях; в, г – под открытым воздухом.

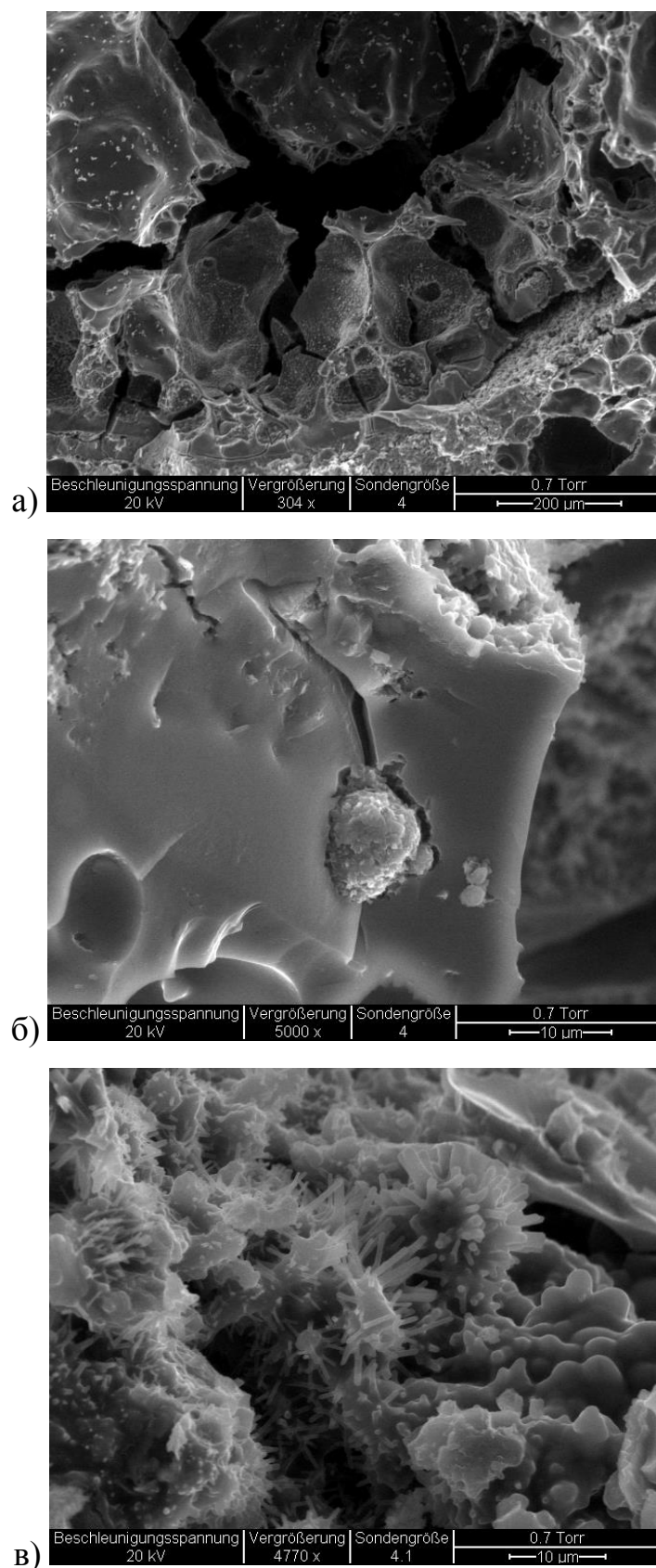


Рисунок 3.32 – Микроскопия образцов ГПС-бетона после трехлетней экспозиции под открытым небом с применением фракции ГПС: а – 0,16 – 5 мм; б – 0,16 – 0,63 мм.

Таким образом, после проведения ускоренных испытаний № 3 и № 4 относительные расширения балочек не превысили допустимые пределы, что говорит о низкой потенциальной реакционной способности ГПС в бетоне. Для проверки адекватности полученных данных в работе проводились микроструктурные исследования образцов после испытания. Ускоренные испытания на расширение бетонных балочек имитировали различные условия эксплуатации бетона. Так, при обильном доступе щелочей из внешней среды, имитируемом испытанием № 3, наблюдаются значительные деструкции структуры композита. При контакте бетона с проточной водой щелочные ионы диссоциируют с поверхности заполнителя и вступают во взаимодействие с кремнеземом заполнителя, способствуя протеканию ЩСР. Однако, по сравнению с испытанием № 3, в этом случае деструкции выражены в значительно меньшей степени. При более мягких условиях эксплуатации ГПС-бетона, которые имитирует испытание № 4, степень протекания ЩСР сокращается. Благоприятные условия эксплуатации ГПС-бетона имитировались при его выдерживании при температуре $20 \pm 2^\circ \text{C}$ и 65% относительной влажности в течение трех лет. После прохождения испытания отмечается целостность структуры композита. Таким образом, степень протекания ЩСР и объем образованного силикатного гидрогеля в ГПС-бетоне зависит от его условий эксплуатации. Внутренние напряжения в бетоне не возникают до тех пор, пока значительная часть порового пространства пеностекла не заполнится силикатным гидрогелем. На основании полученных данных сделан вывод, что СЭМ-ЭДС метод является необходимым при исследовании пористых заполнителей на потенциальную реакционную способность в легком бетоне.

3.7 Определение механизма протекания ЩСР в ГПС-бетонах.

В ходе исследования было выяснено, что в составе ГПС преобладают фазы аморфного кремнезема. Таким образом при применении ГПС в композитах на

основе цемента существует опасность протекания щелочной коррозии. Проявление данного вида коррозии заключается в том, что аморфный оксид кремния может вступать в реакцию с щелочами цемента. Как правило, щелочные соединения поступают в бетон из его компонентов (вяжущее, добавки, заполнители) или из внешних источников. Значение водородного показателя порового раствора бетона составляет в среднем около 12,5. Щелочная среда бетона способствует расщеплению силановых связей кремнезема в заполнителе под действием гидроксид-ионов. Данный процесс деполимеризации приводит к разрыхлению структуры кремнезема заполнителя, в особенности на его поверхности, и внедрению в него щелочных ионов. С увеличением щелочности деполимеризованного кремнезема возрастает его способность сорбировать воду. При поглощении воды материал со временем приобретает структуру раствора, в котором присутствуют силикатные ионы различного полимерного состава. Образуется щелоче-силикатный гидрогель, состоящий из низкополимерных ионов кремниевых кислот и катионов натрия, калия и кальция. Содержание последнего обуславливает вязкость геля, его структуру и способность сорбировать воду. С повышением содержания кальция повышается компактность структуры геля и снижается сорбционная способность.

В современной строительной практике проблема протекания ЩСР наиболее часто встречается в тяжелых бетонах. В силу низкой пористости заполнителей силикатный гидрогель образуется в основном на границе фаз «заполнитель – цементный камень». Поглощение воды ведет к повышению объема щелоче-силикатного гидрогеля, что в свою очередь способствует появлению внутренних осмотических давлений, ведущих к разрушению структуры бетона (рисунок 3.33 «а», «б», «в»). При этом отмечается, что степень протекания ЩСР также находится в зависимости от условий эксплуатации бетона. Наиболее подвержены коррозии конструкции, подверженные агрессивному воздействию внешней среды.

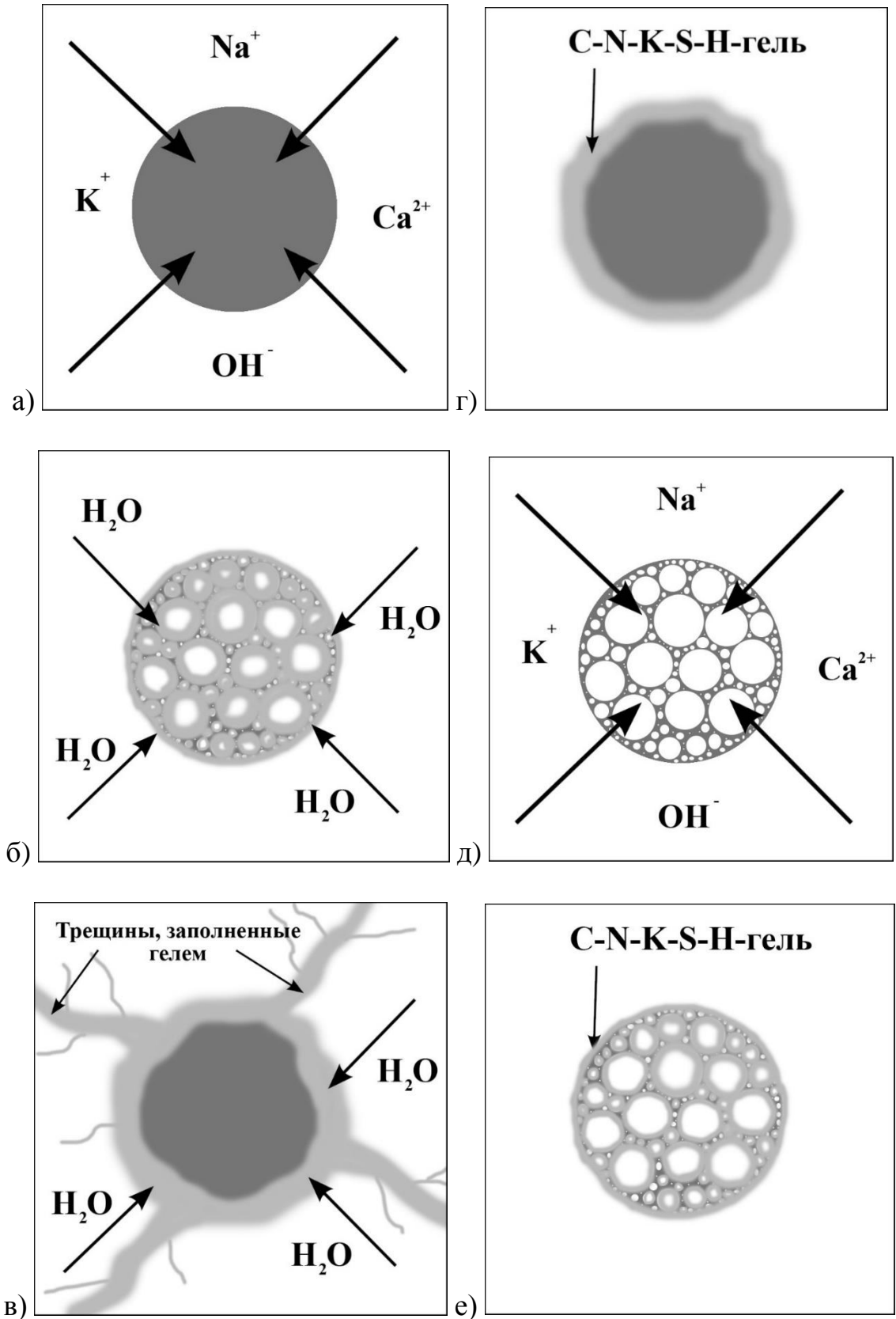


Рисунок 3.34 – Схема протекания ЩСР: а, б, в – в тяжелом и мелкозернистом бетоне; г, д, е – в легком бетоне на пористом заполнителе.

На основании проведенных исследований был предложен механизм взаимодействия реакционноспособного пористого заполнителя со щелочами бетона, отличающийся от механизма протекания ЩСР в тяжелых и мелкозернистых бетонах. Предложенный механизм ЩСР в легких бетонах на пористых заполнителях заключается в структурных преобразованиях кремнезема поверхностного слоя заполнителя в низкоосновные гидросиликаты кальция с образованием усадочных трещин стенок гранул по объему и накоплении солей кремниевой кислоты внутри пор заполнителя без образования продуктов реакции на границе раздела фаз «заполнитель – цементный камень» (рисунок 3.33 «г», «д», «е»). При этом образованный щелоче-силикатный гидрогель накапливается в порах заполнителя. Разрушение бетонной конструкции возможно только после частичного или полного заполнения гелем порового пространства. Таким образом, щелоче-силикатные реакции в ГПС-бетоне не приводят к появлению внутренних осмотических давлений, а способствуют лишь его частичной деструкции в объеме заполнителя.

3.8 Заключение по главе

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения легкого бетона на основе ГПС. Отмечается развитая геометрия поверхности гранул и правильная ячеистая структура с замкнутой пористостью способствует хорошей адгезии заполнителя к цементному камню и высокой прочности бетона на его основе.

2. Предложена методика оценки степени проявления щелоче-силикатных взаимодействий в легких бетонах при использовании реакционноспособных пористых заполнителей, заключающаяся в адаптации существующего метода ГОСТ 8269.0-97 и отличающаяся: применением отличных от стандартной методики химико-минералогических исследований, отличного фракционного состава заполнителя, в том числе при изготовлении испытываемых образцов;

применением микроструктурных и физико-механических исследований образцов после испытания.

3. Отмечена возможность протекания ЩСР при применении ГПС в легких бетонах. Исследуемый заполнитель имеет натрий-кальций-силикатную рентгеноаморфную природу высокой реакционной способности к взаимодействию со щелочами цемента. При этом с уменьшением фракционного размера реакционная способность заполнителя возрастает.

4. Установлен оптимальный по физико-механическим свойствам состав легкого ГПС-бетона. С применением метода планирования регрессионного эксперимента подобраны составы легкого ГПС-бетона плотностью 410–790 кг/м³, прочностью 2,2–6,5 МПа, теплопроводностью 0,09–0,15 Вт/(м·К). Подобраный состав обусловлен более выгодным расходом цемента и заполнителя и достижением максимальных показателей прочности и плотности композита.

5. Установлена потенциальная реакционная способность ГПС в бетоне. Согласно проведенным ускоренным испытаниям на расширение бетонных балочек отмечено отсутствие критических расширений образцов вследствие ЩСР. Микроструктурные исследования структуры образцов после прохождения испытаний показывают зависимость степени протекания ЩСР от условий эксплуатации ГПС-бетона. Внутренние напряжения в бетоне не возникают до тех пор, пока значительная часть порового пространства пеностекла не заполнится силикатным гидрогелем. На основании полученных данных сделан вывод, что СЭМ-ЭДС метод является необходимым при исследовании пористых заполнителей на потенциальную реакционную способность в легком бетоне.

6. Предложен механизм взаимодействия реакционноспособного пористого заполнителя со щелочами бетона, отличный от механизма протекания щелоче-силикатных взаимодействий в тяжелых и мелкозернистых бетонах и заключающийся в структурных преобразованиях кремнезема поверхностного слоя заполнителя в низкоосновные гидросиликаты кальция с образованием усадочных трещин стенок гранул по объему и накоплении солей кремниевой кислоты внутри пор заполнителя без образования продуктов реакции на границе раздела фаз

«заполнитель – цементный камень». Таким образом, щелоче-силикатные реакции в бетоне на основе гранулированного пеностекла не приводят к появлению внутренних осмотических давлений, а способствуют лишь его частичной деструкции в объеме заполнителя.

4. РАЗРАБОТКА ПРЕВЕНТИВНЫХ МЕР ПРОТИВ ПРОТЕКАНИЯ ЩСР В ГПС-БЕТОНЕ

4.1 Выбор превентивных мер против протекания ЩСР в ГПС-бетоне

На основании проведенных исследований выяснено, что степень проявления ЩСР в ГПС-бетоне находится в прямой зависимости от степени доступа щелочей из внешней среды, которая, в свою очередь, зависит от множества климатических и техногенных факторов расположения материала в строительной конструкции. К условиям, способствующим дополнительному доступу щелочей из внешней среды и ускорению негативных химических процессов в теле бетона, можно отнести применение разрабатываемого бетона в качестве ограждающих конструкций зданий и сооружений, что составляет основную область применения ГПС-бетона. Поэтому, при применении разрабатываемого композита в данных условиях, существует необходимость дополнительного использования превентивных мер в составе композита.

На основе литературных данных известно, что протекания негативных химических процессов в бетонах в результате ЩСР значительно ингибируются при снижении уровня щелочей в цементе, при использовании воздухововлекающих добавок, а также при замещении цемента активными пуццолановыми добавками. Воздухововлекающие добавки не применялись по причине высокой пористости заполнителя. В качестве пуццолановых добавок были выбраны зола уноса и микрокремнезем. Цемент для контрольных составов содержал (по эквиваленту оксида натрия Na_2O_e) от 0,86 до 1,13 % щелочей. Согласно ГОСТ 8269.0-97, при применении потенциально реакционных заполнителей рекомендуется применять низкощелочные цементы, содержание щелочных соединений в которых не превышает 0,6 %. В работе использовался цемент с содержанием $\text{Na}_2\text{O}_e=0,48\%$

0,62%. В качестве пуццолановых добавок были выбраны низкорреакционная зола-унос, а также высокорреакционный микрокремнезем.

В работе исследовалась потенциальная реакционная способность к проявлению ЩСР как контрольного состава ГПС-бетона, так и составов, в которых использовались превентивные меры против возникновения коррозии. Модифицированные образцы проходили испытания № 3 и № 4 предложенной методики. Эффективность различных способов превентирования ЩСР оценивалась по снижению значения относительного расширения модифицированных образцов по сравнению с образцами контрольного состава.

4.2 Зависимость степени протекания ЩСР от содержания щелочей в ГПС-бетоне

На первом этапе исследования в работе изучалось влияние содержания щелочей в ГПС-бетоне на степень протекания в нем ЩСР. Ускоренное испытание № 3 на выдерживание образцов в 1М растворе NaOH при температуре 80° С в течение 14-суток прошли образцы с использованием как обычного, так и низкощелочного цемента (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Составы образцов ГПС-бетона для прохождения 14-суточной ускоренной методики на выдерживание образцов в 1М растворе NaOH при температуре 80° С. Тип использованного цемента и водоцементное отношение

№	Используемый тип цемента, В/Ц	Условное обозначение
1	ЦЕМ I 42,5 Н НЩ ДП (низкощелочной); В/Ц 0.6	0,48
2	ЦЕМ I 42,5 Н; В/Ц 0.6	0,86

На рисунке 4.1 представлены результаты испытания № 3 на выдерживание образцов ГПС-бетона в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 14-ти суток. Образцы контрольного состава с применением цемента с $Na_2O_e = 0,86$ показали расширение в 0,055%. Использование цемента с $Na_2O_e = 0,48$ способствовало уменьшению расширений на 0,01%. При продлении испытания до 28-ми суток разница между расширениями образцов увеличилась до 0,015% (рисунок 4.2).

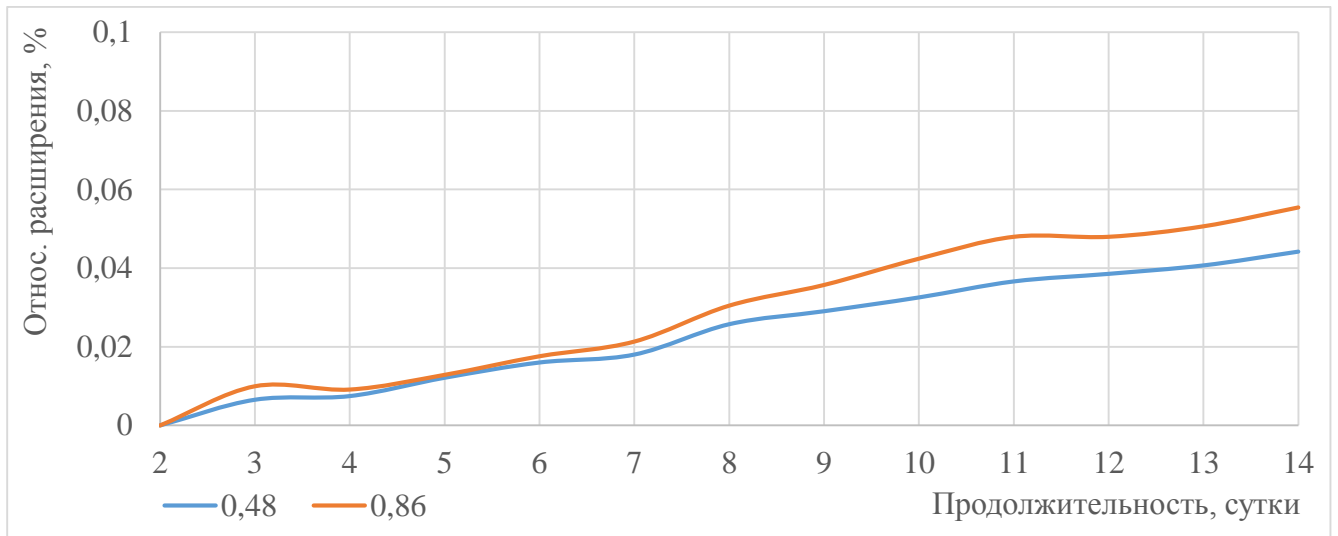


Рисунок 4.1 – Испытание образцов ГПС-бетона на расширение с применением цемента с различным содержанием щелочей ($Na_2O_e = 0,48$ и $0,86$) в 1М растворе NaOH при 80°С в течение 14 суток.

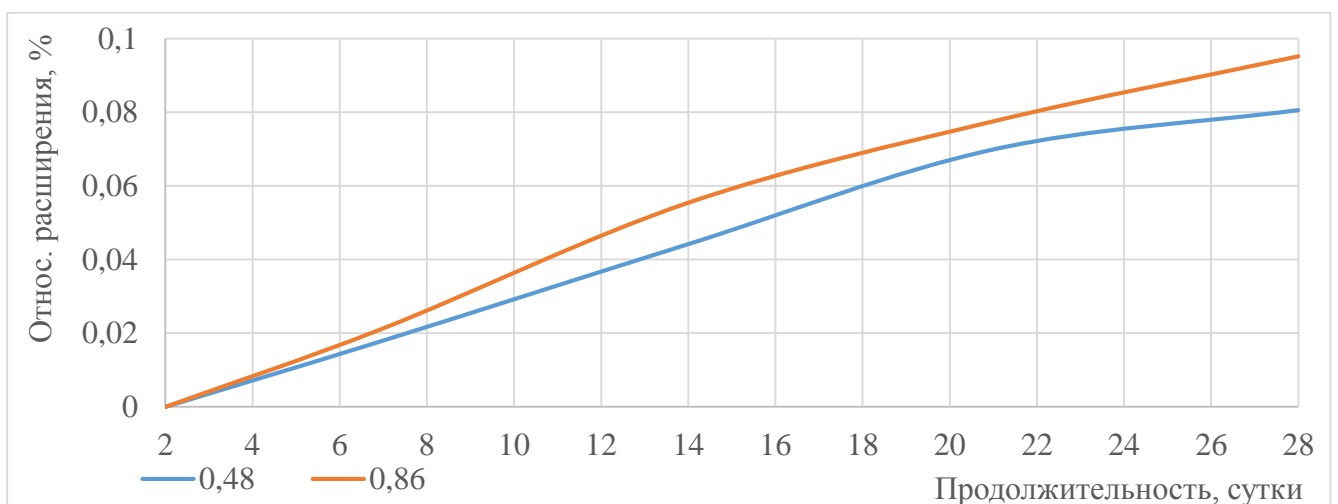


Рисунок 4.2 – Испытание образцов ГПС-бетона на расширение с применением цемента с различным содержанием щелочей ($Na_2O_e = 0,48$ и $0,86$) в 1М растворе NaOH при 80°С в течение 28 суток.

В работе образцы ГПС-бетона представленного состава были выдержаны также в дистиллированной воде при температуре 80 °С в течение 14 суток. Из рисунка 4.3 видно, что в данных условиях тенденция влияния содержания щелочей в цементе на протекание ЩСР сохраняется - наибольшим расширениям подвержены образцы с более высоким содержанием щелочей в цементе. Относительные расширения балочек, по сравнению с образцами, выдержанными в 1М растворе NaOH, снизились примерно в 2 раза: до 0,025% и 0,019% для цемента с $Na_2O_e = 0,86$ и 0,48, соответственно. Как видно, динамика расширения образца для состава с применением низкощелочного цемента в первой половине срока экспозиции невысока и увеличивается только ко второй половине срока проведения эксперимента.

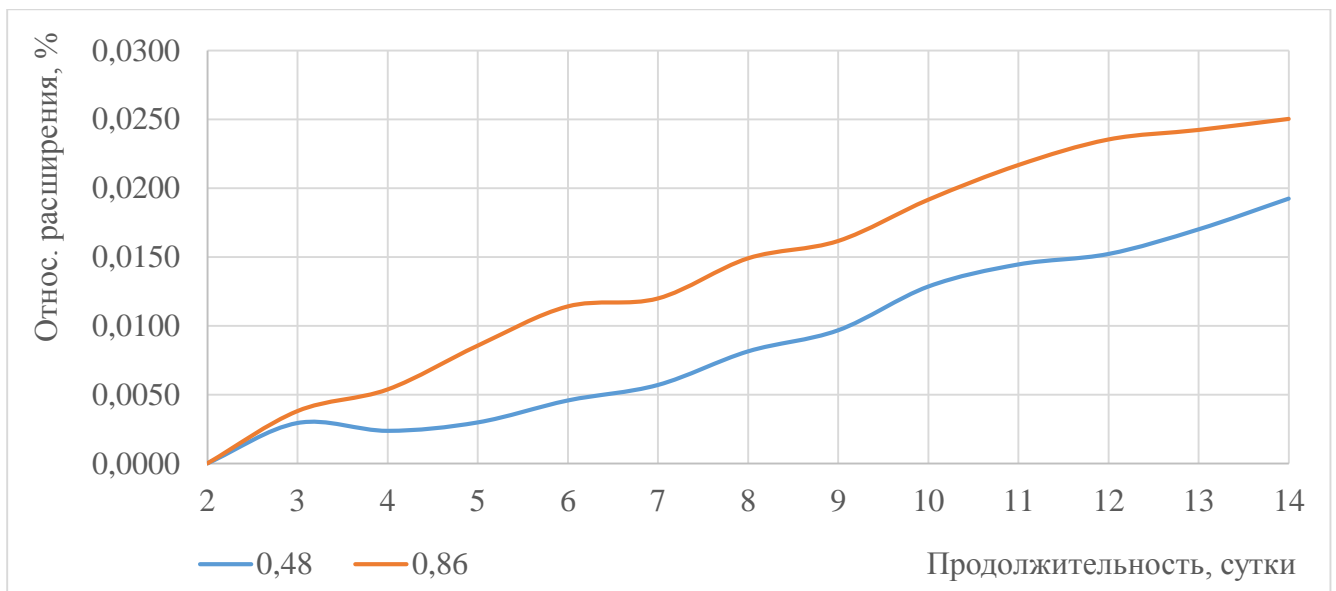


Рисунок 4.3 – Расширения образцов ГПС-бетона с применением цементов с различным содержанием щелочей ($Na_2O_e = 0,48$ и 0,86) при выдерживании в дистиллированной воде при температуре 80° С в течение 14 суток.

Образцы, составы которых отличались различным содержанием щелочей, выдерживались в климатической камере при 40° С и 100% относительной влажности в течение года (испытание № 4). Составы образцов представлены в таблице 4.2. Расширения образцов после прохождения эксперимента представлено

на рисунке 4.4. Как видно, в контрольных образцах с применением цемента с содержанием щелочей $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$ относительные расширения образцов не превысили допустимый предел в 0,04% и составили 0,031%. При применении цемента с $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,48$ расширения значительно снизились и их значения составили 0,012%. Для увеличения содержания щелочей бетоне применялась каустическая сода, которая добавлялась в воду затворения при изготовлении образцов. При увеличении содержания щелочей в образце в два раза ($\text{Na}_2\text{O}_e = 1,72$) относительное расширение повысилось до 0,038%. При дальнейшем увеличении щелочей в образце ($\text{Na}_2\text{O}_e = 2,58$) расширения практически не повышались и составили 0,039%.

Таблица 4.2 – Составы образцов ГПС-бетона для прохождения эксперимента на расширение бетонных балочек при темп. 40° С и 100% отн. влажн. в течение одного года. Тип использованного цемента, В/Ц, вид добавки

№	Используемый тип цемента, В/Ц, вид добавки	Условное обозначение
1	ЦЕМ I 42,5 Н НЩ ДП ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,48$); В/Ц 0.6	0,48
2	ЦЕМ I 42,5 Н ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$); В/Ц 0.6	0,86
3	ЦЕМ I 42,5 Н ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$); В/Ц 0.6; дополнительное введение NaOH в воду затворения	1,72
4	ЦЕМ I 42,5 Н ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$); В/Ц 0.6; дополнительное введение NaOH в воду затворения	2,58

В работе образцы ГПС-бетона, составы которых отличались различным содержанием щелочей, помимо климатической камеры были также выдержаны при нормальных условиях, а именно при температуре $20 \pm 2^\circ \text{C}$ и 65% относительной влажности в течение года (рисунок 4.5). Как видно, в данных условиях расширений не наблюдаются, а вместо них образцы показали усадку. Для цемента с $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,48$ и 0,86 значения усадок составили близкие значения 0,93 и 0,95%, соответственно.

При увеличении содержания щелочей в образце значения усадок снижаются и при $\text{Na}_2\text{O}_e = 1,72$ и $2,58$ составляет $0,046\%$ и $0,016\%$ соответственно.

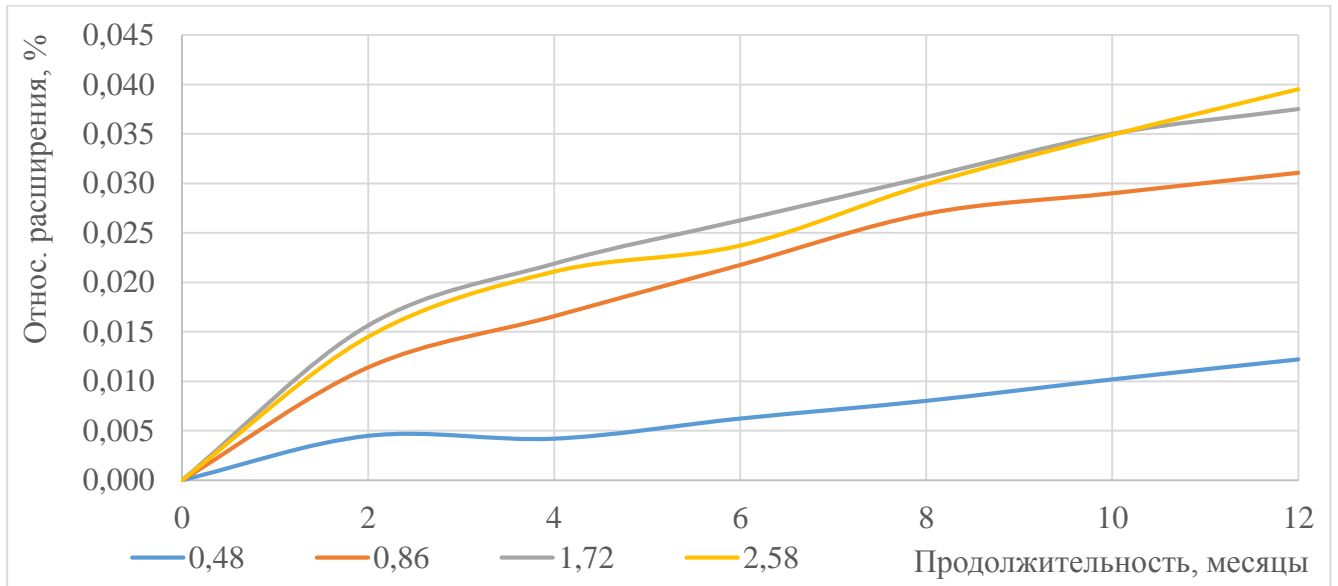


Рисунок 4.4 – Расширения образцов ГПС-бетона с применением цементов с различным содержанием Na_2O_e после экспозиции в климатической камере при 40°C и 100% относительной влажности в течение одного года.

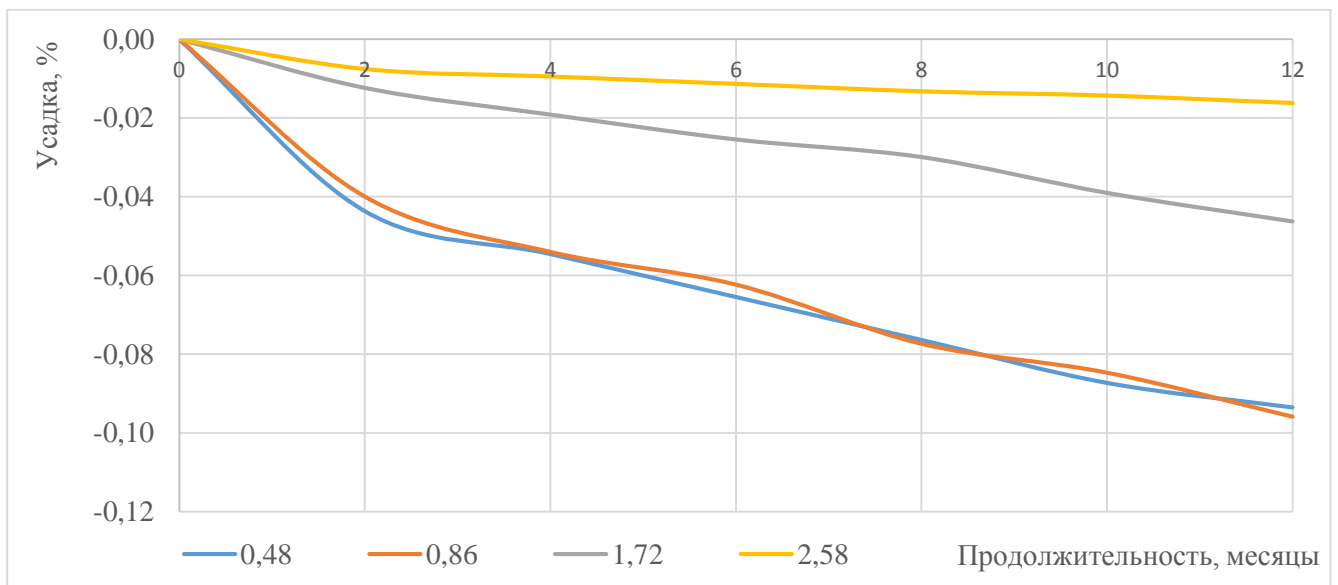


Рисунок 4.5 – Расширения образцов ГПС-бетона с применением цементов с различным содержанием Na_2O_e после выдерживания в нормальных условиях (температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и 65% относительной влажности) в течение одного года.

В таблице 4.3 приведены сводные данные по итоговым расширениям образцов после прохождения ускоренных испытаний на расширение бетонных балочек после прохождения испытания № 3 и № 4.

Таблица 4.3 – Итоговые расширения образцов после прохождения испытаний на расширение бетонных балочек

Вид испытания	Содержание щелочей в бетоне (Na_2O_e)	Итоговое отн. расширение образца, %
Экспозиция в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 14 суток	0,86	0,055
	0,48	0,044 (- 20 %)*
Экспозиция в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 28 суток	0,86	0,095
	0,48	0,08 (- 16 %)
Экспозиция в дистиллированной воде при температуре 80° С в течение 14 суток	0,86	0,025
	0,48	0,019 (- 24 %)
Экспозиции в климатической камере при 40°С и 100% относительной влажности в течение одного года	0,48	0,012
	0,86	0,031 (+ 158 %)
	1,72	0,037 (+ 208 %)
	2,58	0,039 (+ 225 %)
* в скобках указано отличие (в процентах) относительного расширения образца представленного состава от контрольного состава (первого в списке для данного испытания)		

Таким образом, в работе образцы, составы которых отличались различным содержанием щелочей, проходили как ускоренные испытания № 3 и № 4, так и некоторые дополнительные испытания. На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что эффективность применения низкощелочного цемента в качестве превентивной меры против протекания ЩСР находится в зависимости от особенностей условий эксплуатации бетона, которые были симулированы

соответствующими испытаниями образцов. Использование низкощелочного цемента способствовало снижению относительных удлинений образцов по сравнению с контрольными составами на 16 % и 60 % после прохождения испытания № 3 и № 4, соответственно. Условия проведения испытания № 3 обеспечивают ускорение химических реакций в теле бетона и обильный доступ щелочей в бетон в процессе эксперимента, поэтому снижение количества щелочей в цементе практически не сказывается на итоговом сокращении относительных расширений образцов. В свою очередь, испытание № 4 имитировало более мягкие условия эксплуатации ГПС-бетона с меньшим доступом щелочей из внешней среды, поэтому использование низкощелочного цемента способствовало наибольшему сокращению итоговых расширений образцов. В данных условиях степень протекания ЩСР в ГПС-бетоне находится в прямой зависимости от количества щелочей в его составе. При содержании щелочей (по Na_2O_e) в пределах 0,62, 1,01 и 2,02 относительные расширения образцов после прохождения испытания № 4 составили 0,012, 0,031 и 0,038, соответственно.

Стоит отметить, что расширения показали в том числе образцы, выдержанные в дистиллированной воде. На начальном этапе проведения эксперимента наблюдается низкая динамика расширения образца, которая увеличивается только ко второй половине проведения эксперимента. Судя по динамике набора расширений, ГПС способствует дополнительному насыщению поровой жидкости бетона щелочами, однако применение цементов с низким значением Na_2O_e ведет к сокращению насыщения раствором щелочными ионами и тем самым препятствует протеканию ЩСР. Таким образом, протекание ЩСР возможно даже в условиях низкого содержания щелочей в цементе и доступа из внешней среды. Однако степень проявления ЩСР в данном случае значительно сокращается.

При выдерживании образцов при нормальных условиях (температуре $20 \pm 2^\circ \text{C}$ и 65% относительной влажности) балочки, в составе которых применялся как обычный, так и низкощелочной цемент, показали практически одинаковое

значение усадок до 1 % по длине образцов. Данное значение усадок свойственно большинству легких бетонов. С увеличением значения щелочей в составе бетона значения усадки сокращается. Это подтверждает гипотезу о том, что усадки компенсируются расширениями образцов, происходящих вследствие ЩСР.

4.3 Влияние действия пуццолановых добавок на протекание ЩСР в ГПС-бетоне

Так как применение низкощелочного цемента не является эффективной превентивной мерой против протекания ЩСР в ГПС-бетоне при неблагоприятных условиях его эксплуатации, в работе исследовалось ингибирующее действие пуццолановых добавок против протекания коррозии.

Ускоренное испытание № 3 на выдерживание образцов в 1М растворе NaOH при температуре 80° С в течение 14-суток прошли образцы, составы которых отличались различным содержанием пуццолановых добавок. Составы образцов ГПС-бетона представлены в таблице 4.4. Для всех составов применялся цемент с содержанием щелочей $Na_2O_e = 0,86$. Составы подбирались на основе полученных ранее с корректировкой водоцементного отношения при применении пуццолановых добавок. Результаты испытания представлены на рисунке 4.6.

Расширения образца контрольного состава составили 0,055%. Пуццолановые добавки значительно сократили расширения балочек. Так, при добавлении к цементу золы-уноса в количестве 30% по его массе, относительные расширения образцов снизились до 0,032%. Наименьшее расширение 0,025% по результатам испытания № 3 показали образцы, в которых 10% цемента по массе было заменено микрокремнеземом.

Таблица 4.4 – Составы образцов ГПС-бетона для прохождения ускоренного испытания № 3 на выдерживание образцов в 1М растворе NaOH при темп. 80° С в течение 14 суток. Тип использованного цемента и наличие пуццолановых добавок

№	Используемый тип цемента, В/Ц, вид добавки	Условное обозначение
1	ЦЕМ I 42,5 Н ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$); В/Ц 0,6	Контрольный состав
2	ЦЕМ I 42,5 Н ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$); замена 10% от масс. цем. микрокремнеземом; В/Ц 0,7	Замена 10% МК, В/Ц 0,7
3	ЦЕМ I 42,5 Н ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$); добавка 40% от масс. цем. золы уноса; В/Ц 0,7	Добавка 30% ЗУ, В/Ц 0,7

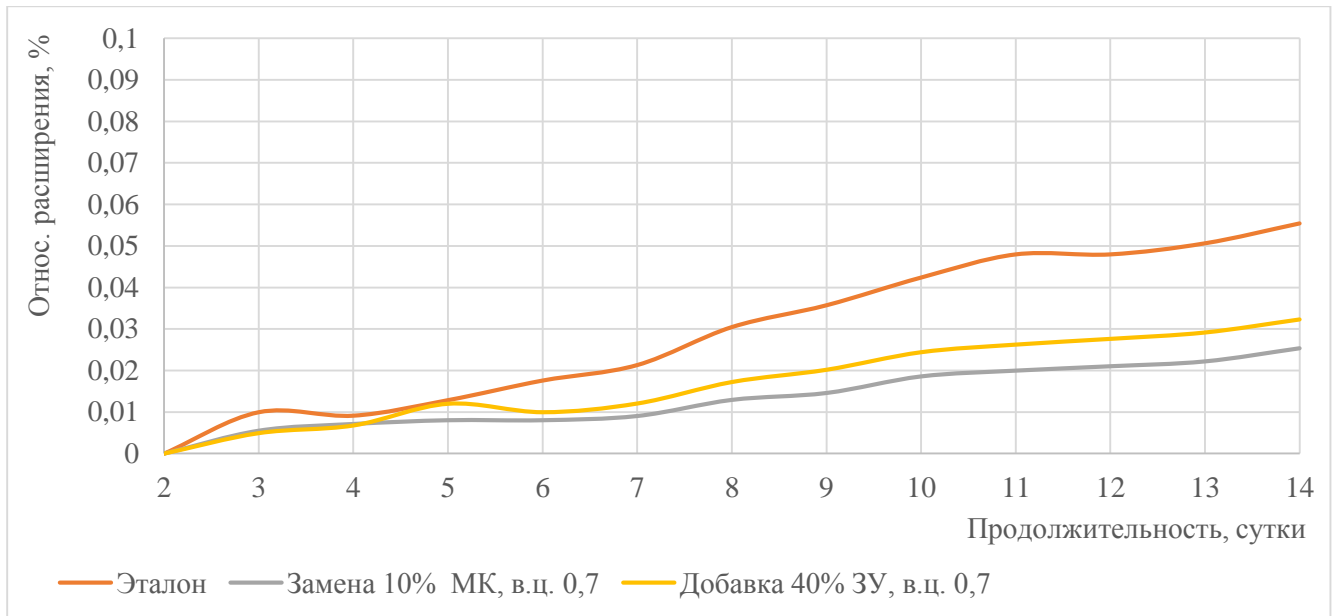


Рисунок 4.6 – Относительные расширения образцов ГПС-бетона с различным содержанием пуццолановых добавок при выдерживании в 1М растворе NaOH при темп. 80° С в течение 14 суток.

При увеличении срока проведения эксперимента в два раза тенденция снижения расширений для образцов, содержащих пуццолановые добавки, сохраняется. Так, к 28 суткам экспозиции в щелочном растворе относительные расширения образцов составили 0,067 % и 0,073 % для составов с применением

золы-уноса и микрокремнезема, соответственно (рисунок 4.7). Как видно, под действием щелочного раствора в течение длительного времени динамика набора относительных расширений образцов с 10% заменой цемента микрокремнеземом становится выше, чем у образцов с 30% добавкой по золы-уноса по массе цемента. Меньшие расширения образцов, содержащих золу-унос, вероятно, связаны с их более высокой плотностью. При добавке 30 % золы уноса по массе цемента плотность бетона возрастает, в среднем, на 100 кг/м^3 . В работе была выдвинута гипотеза зависимости степени протекания ЩСР от плотности бетона. Для проверки данной гипотезы образцы различной плотности проходили ускоренное испытание № 3. Плотность образцов варьировалась при изменении содержания вяжущего в их составе. На рисунке 4.8 представлены кривые расширения образцов плотностью 400 кг/м^3 , 600 кг/м^3 , 750 кг/м^3 . Как видно из графиков, с увеличением содержания цемента в композите улучшается его стойкость к щелочной коррозии. При этом относительные расширения образцов плотностью 600 кг/м^3 и 750 кг/м^3 имеют близкие значения.

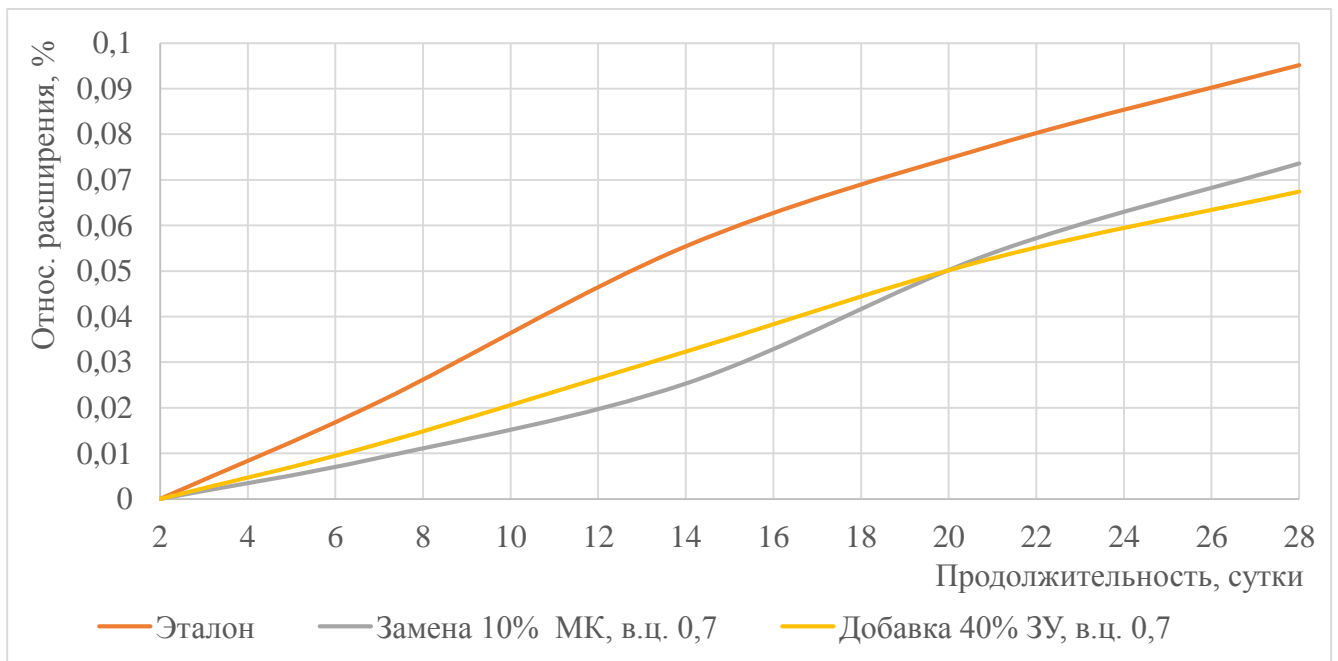


Рисунок 4.7 – Относительные расширения образцов ГПС-бетона с различным содержанием пуццолановых добавок при выдерживании в 1М растворе NaOH при 80°C в течение 28 суток.

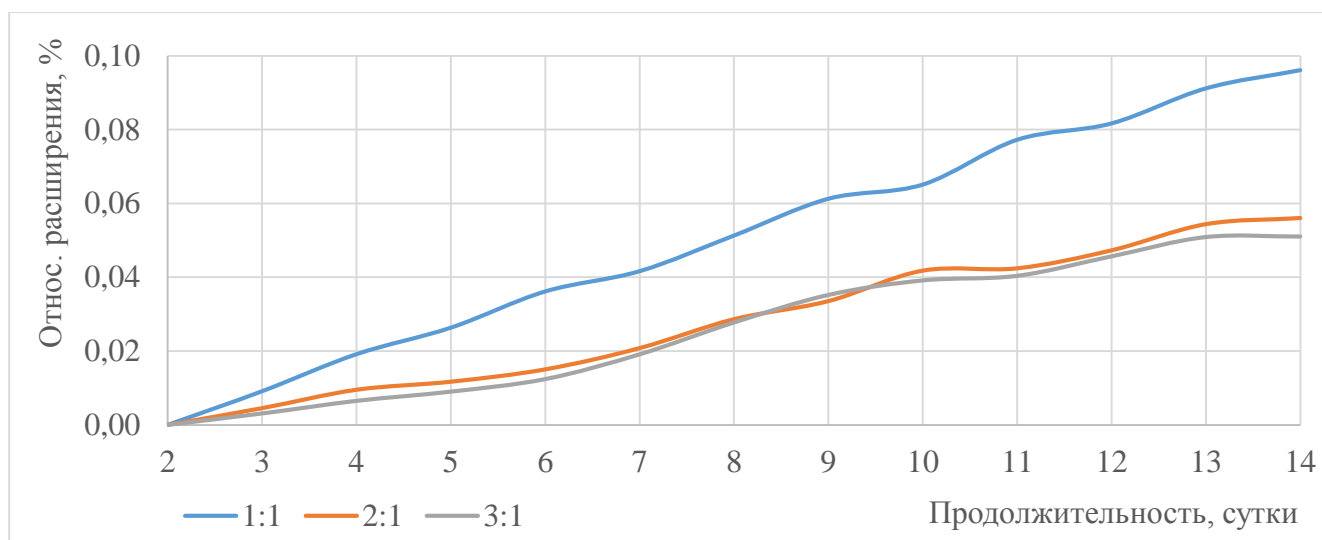


Рисунок 4.8 – Относительные расширения образцов ГПС-бетона различной плотности при выдерживании в 1М растворе NaOH при 80 °С в течение 14 суток. Соотношение вяжущего в заполнителю, масс: 1:1 - 450 кг/м³, 2:1 - 600 кг/м³, 3:1 - 750 кг/м³.

В работе относительные расширения балочек с применением цемента с различным содержанием щелочей, выдержанных в 1М растворе NaOH при температуре 80° С в течение 14 суток, сравнивались с расширениями балочек, выдержанных в дистиллированной воде при той же температуре. Результаты проведения испытания представлены на рисунке 4.9. Расширения образца контрольного состава составили порядка 0,025%. Наличие в образцах 30 % добавки от массы цемента золы-уноса практически не снизило относительных расширений балочек, значения которых составили около 0,021%. В то же время 10 % замена цемента микрокремнеземом значительно сократила относительные расширения в течение всей продолжительности эксперимента. Итоговые расширения образцов, содержащих микрокремнезем, составили 0,017%.

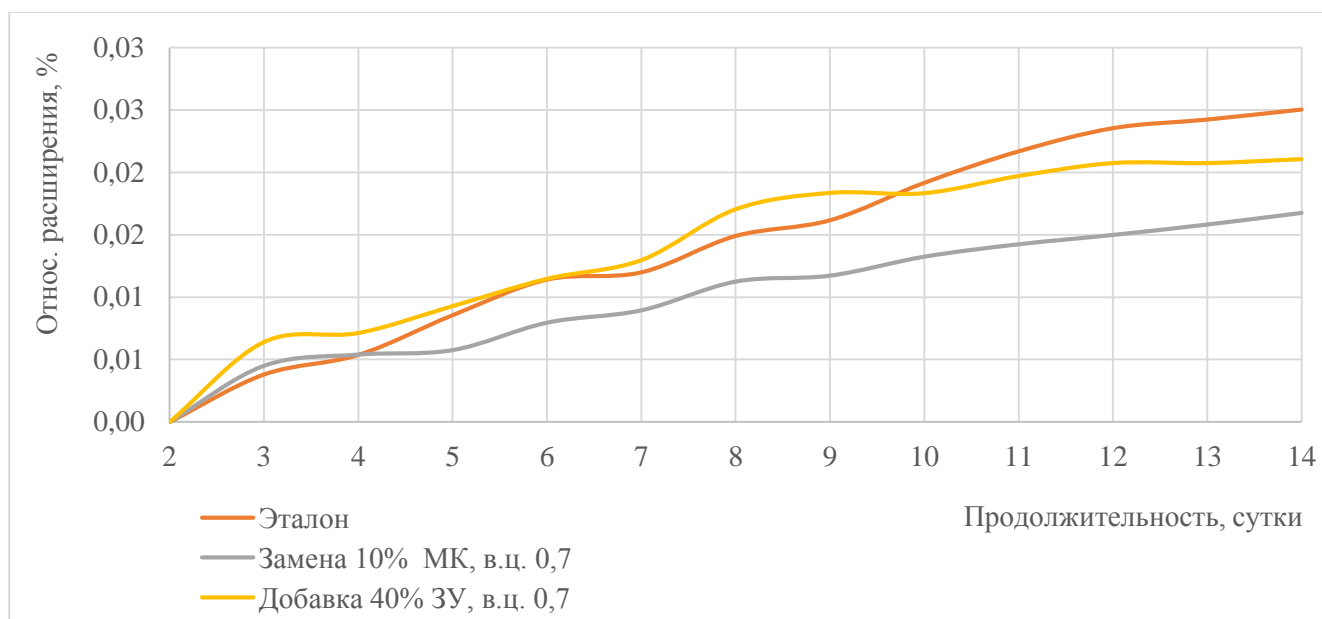


Рисунок 4.9 – Расширения образцов ГПС-бетона, составы которых отличались различным содержанием пуццолановых добавок, при выдерживании в дистиллированной воде при температуре 80° С в течение 14 суток.

Испытание № 4 на выдерживание образцов в климатической камере при 40° С и 100% относительной влажности в течение одного года прошли образцы, составы которых отличались различным содержанием пуццолановых добавок. Составы образцов представлены в таблице 4.5. Результаты проведения испытания представлены на рисунке 4.10. Относительные расширения эталонного образца составили 0,031%. При замещении 20% цемента по массе золой-уноса относительные расширения снизились до 0,027%. При добавлении к цементу 30% по массе золы уноса при В/Ц 0,6 и 0,7 относительные расширения составили 0,021% и 0,023% соответственно. При замещении 10% цемента по массе микрокремнеземом относительные расширения составили минимальное значение 0,011%.

В работе образцы ГПС-бетона, составы которых отличались различным содержанием пуццолановых добавок, помимо климатической камеры с температурой 40° С и 100% относительной влажности были выдержаны также в нормальных условиях (температуре 20±2° С и 65% относительной влажности) в

течение одного года (рисунок 4.11). Усадка эталонного образца составила 0,95%. Пуццолановые добавки способствуют снижению усадок. Наименьшее значение усадки показал образец с добавлением золы-уноса в количестве 30% от массы цемента.

Таблица 4.5 – Составы образцов ГПС-бетона для прохождения испытания № 4 на расширение бетонных балочек при 40° С и 100% относительной влажности в течение одного года. Тип использованного цемента, В/Ц, вид добавки

№	Используемый тип цемента, В/Ц, вид добавки	Условное обозначение
1	ЦЕМ I 42,5 Н ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$); В/Ц. 0,6	Контрольный состав
2	ЦЕМ I 42,5 Н ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$); В/Ц 0,7; добавка 30% от масс. цем. золы уноса	Добавка 30% ЗУ, В/Ц 0,7
3	ЦЕМ I 42,5 Н ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$); В/Ц 0,6; добавка 30% от масс. цем. золы уноса	Добавка 30% ЗУ, В/Ц 0,6
4	ЦЕМ I 42,5 Н ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$); В/Ц 0,6 ;замена 30% от масс. цем. золы уноса	Замена 30% ЗУ, В/Ц 0,6
5	ЦЕМ I 42,5 Н ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,86$); В/Ц 0,7; замена 10% от масс. цем микрокремнеземом	Замена 10% МК, В/Ц 0,7

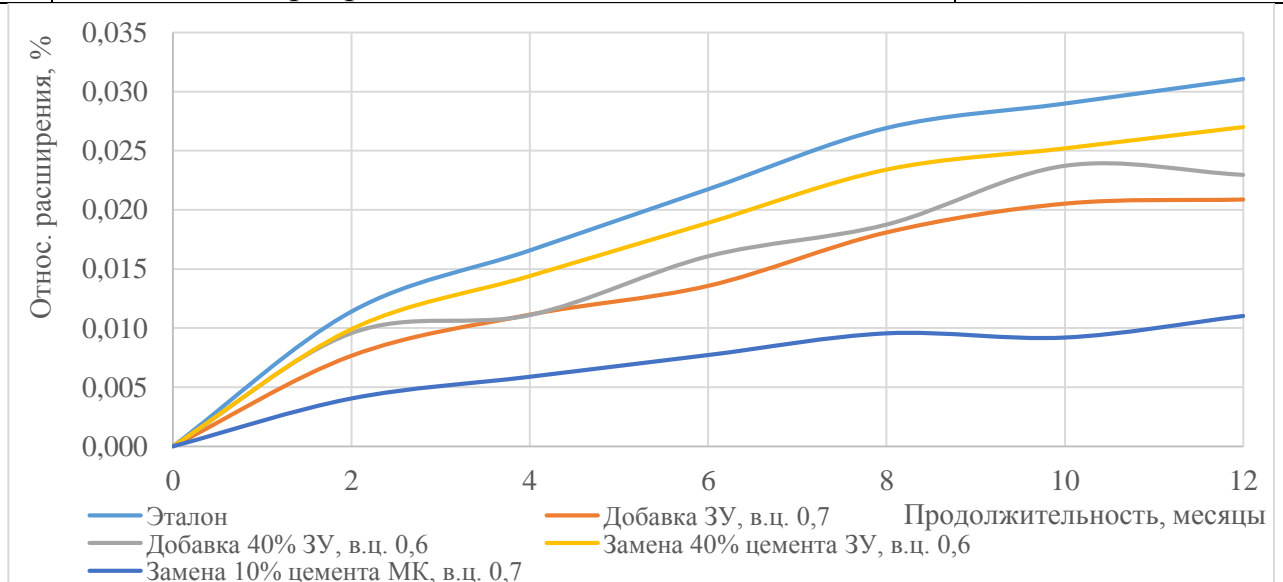


Рисунок 4.10 – Относительные расширения образцов ГПС-бетона, составы которых отличались содержанием пуццолановых добавок, после выдерживания в климатической камере при 40°С и 100% относительной влажности.

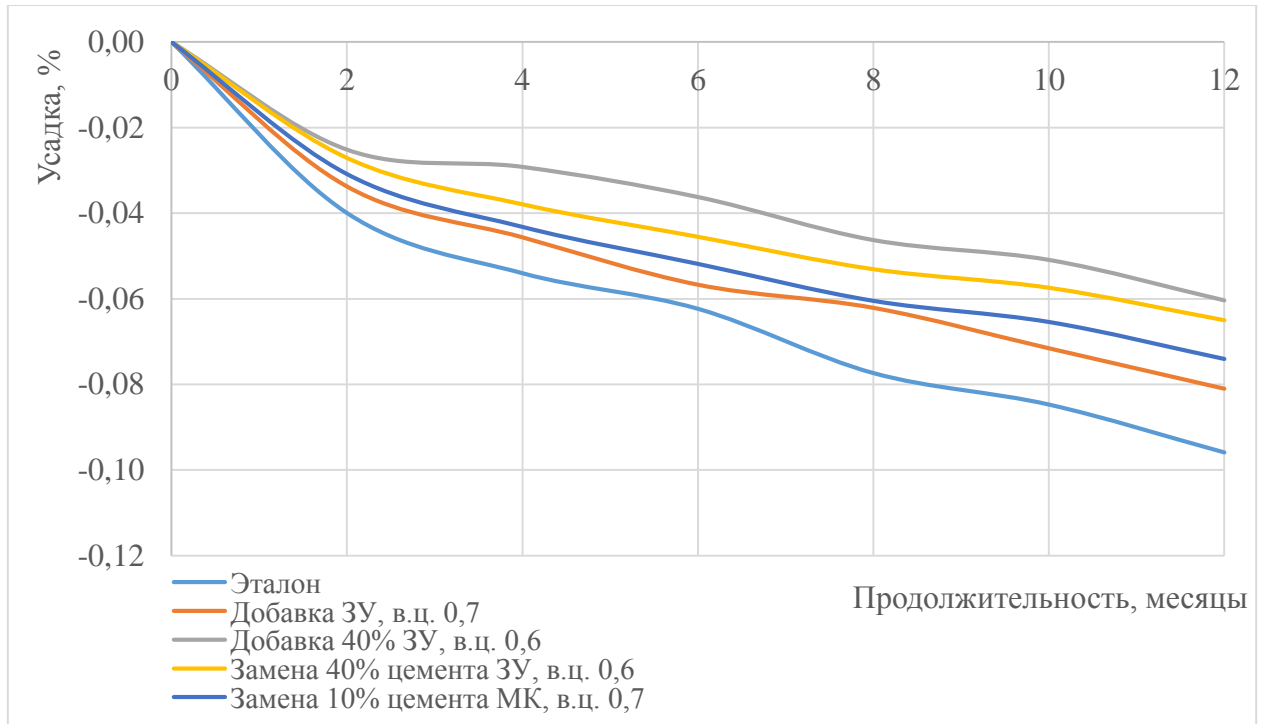


Рисунок 4.11 – Усадка образцов ГПС-бетона, составы которых отличались содержанием пуццолановых добавок, после выдерживания в нормальных условиях (температуре $20\pm 2^\circ\text{C}$ и 65% относительной влажности) в течение одного года.

В таблице 4.6 приведены сводные данные по итоговым расширениям образцов после прохождения ускоренных испытаний на расширение бетонных балочек.

В работе, также, изучалась зависимость степени проявления ЩСР в ГПС-бетоне от фракционного размера ГПС. Как известно, помимо области теплоизоляционно-конструкционных бетонов, ГПС может также эффективно применяться при производстве теплоизоляционных кладочных растворов и штукатурных смесей. Для получения теплоизоляционных кладочных растворов рекомендуется применение фракции ГПС не более 1,5 мм, а для штукатурных смесей – не более 0,5 мм.

Таблица 4.6 – Итоговые расширения образцов после прохождения испытаний на расширение бетонных балочек

Вид испытания	Особенности состава ГПС-бетона	Итоговое отн. расш. образца, %
Экспозиция в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 14 суток	Контрольный состав	0,055
	Добавка 30% ЗУ, В/Ц 0,7	0,032 (- 42 %)
	Замена 10% МК, В/Ц 0,7	0,025 (- 55 %)
Экспозиция в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 28 суток	Контрольный состав	0,095
	Добавка 30% ЗУ, В/Ц 0,7	0,073 (- 23 %)
	Замена 10% МК, В/Ц 0,7	0,067 (- 29 %)
Экспозиция в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 14 суток	Плотность 400 кг/м ³	0,096
	Плотность 600 кг/м ³	0,056 (- 42 %)
	Плотность 750 кг/м ³	0,051 (- 47 %)
Экспозиция в дистил. воде при температуре 80° С в течение 14 суток	Контрольный состав	0,025
	Добавка 30% ЗУ, В/Ц 0,7	0,021 (- 16 %)
	Замена 10% МК, В/Ц 0,7	0,017 (- 32 %)
Экспозиции в клим. камере при 40° С и 100% относительной влажности в течение одного года	Контрольный состав	0,031
	Замена 30% ЗУ, В/Ц 0,6	0,027 (- 13 %)
	Добавка 30% ЗУ, В/Ц 0,7	0,022 (- 32 %)
	Замена 10% МК, В/Ц 0,7	0,011 (- 65 %)
Экспозиции при 20° С и 65% относительной влажности в течение одного года	Контрольный состав	- 0,095
	Замена 30% ЗУ, В/Ц 0,6	- 0,064 (+ 32 %)
	Добавка 30% ЗУ, В/Ц 0,7	- 0,060 (+ 37 %)
	Замена 10% МК, В/Ц 0,7	- 0,074 (+ 22 %)
* в скобках указано отличие (в процентах) относительного расширения образца представленного состава от контрольного состава (первого в списке для данного испытания)		

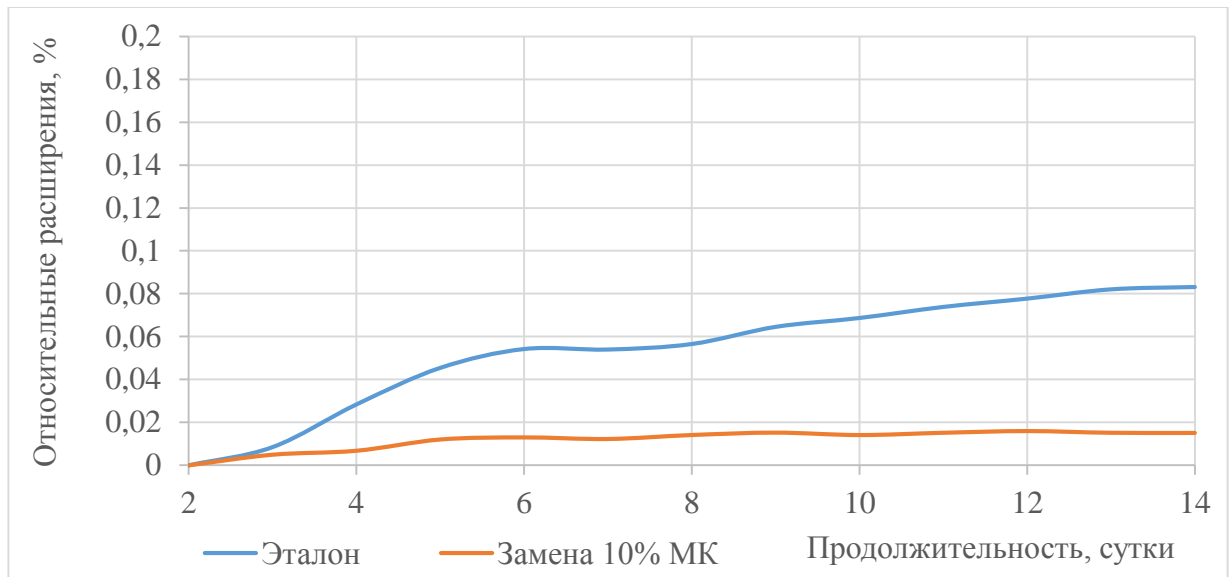


Рисунок 4.12 – Испытание образцов ГПС-бетона, содержащих фракцию ГПС 0,315 - 0,5 мм, на расширение в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 14 суток, контрольных составов и с применением добавки микрокремнезема.

Ускоренное испытание № 3 проходили образцы ГПС-бетона, в которых применялась смесь ГПС фракционного размера: 0,315 - 0,5, 1,0 - 1,5 и 0,16 – 5 мм. Помимо контрольных составов, аналогичное испытание прошли образцы, в которых 10% цемента были замещены микрокремнеземом. Результаты прохождения испытания образцов, содержащих фракцию ГПС 0,315 - 0,5 мм и 1,0 - 1,5 мм, представлена на рисунках 4.12 и 4.13. Для образцов контрольного состава результаты прохождения испытания были приведены на рисунке 4.6. Как видно, итоговые расширения При использовании микрокремнезема относительные расширения образцов с применением фракций 0,16 – 5, 0,315 - 0,5 и 1,0 - 1,5 мм сократилась на 54 %, 81 % и 29 %, соответственно.

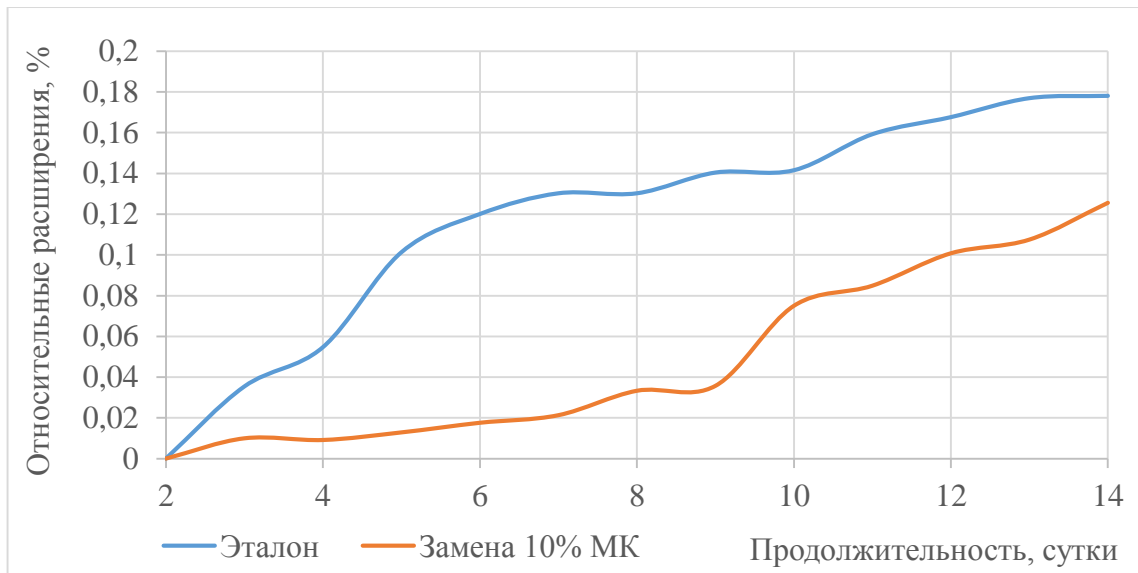


Рисунок 4.13 – Испытание образцов ГПС-бетона, содержащих фракцию ГПС 1,0 – 1,5 мм, на расширение в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 14 суток, контрольных составов и с применением добавки микрокремнезема.

Также в работе образцы ГПС-бетона с применением смеси ГПС фракционного размера 0,315 – 0,5 мм проходили испытание № 4 и были выдержаны в климатической камере при температуре 40 °С и 100 % относительной влажности. Результаты испытания представлены на рисунке 4.14. Фракция 1,0 - 1,5 мм в связи с превышением допустимого предела на расширение после прохождения испытания № 3 была исключена из дальнейшего исследования. Как видно, данные образцы после экспозиции в климатической камере, не зависимо от наличия пуццолановых добавок, имеют близкие значения относительных расширений порядка 0,024 %. Также часть образцов с применением смеси ГПС фракционного размера 0,315 – 0,5 мм были выдержаны при нормальных условиях при температуре $20 \pm 2^\circ \text{C}$ и 65% относительной влажности. Результаты испытания представлены на рисунке 4.15. Как видно, образцы, выдержанные при нормальных условиях, также показали расширения. Однако их значения относительных расширений были значительно ниже, чем у образцов, экспонированных в климатической камере, и составили 0,013 % и 0,011 % для контрольного и модифицированного микрокремнеземом образца, соответственно. Стоит отметить,

что в отличие от смеси ГПС 0,16 – 5 мм, образцы на основе мелкой фракции ГПС не показали усадок.

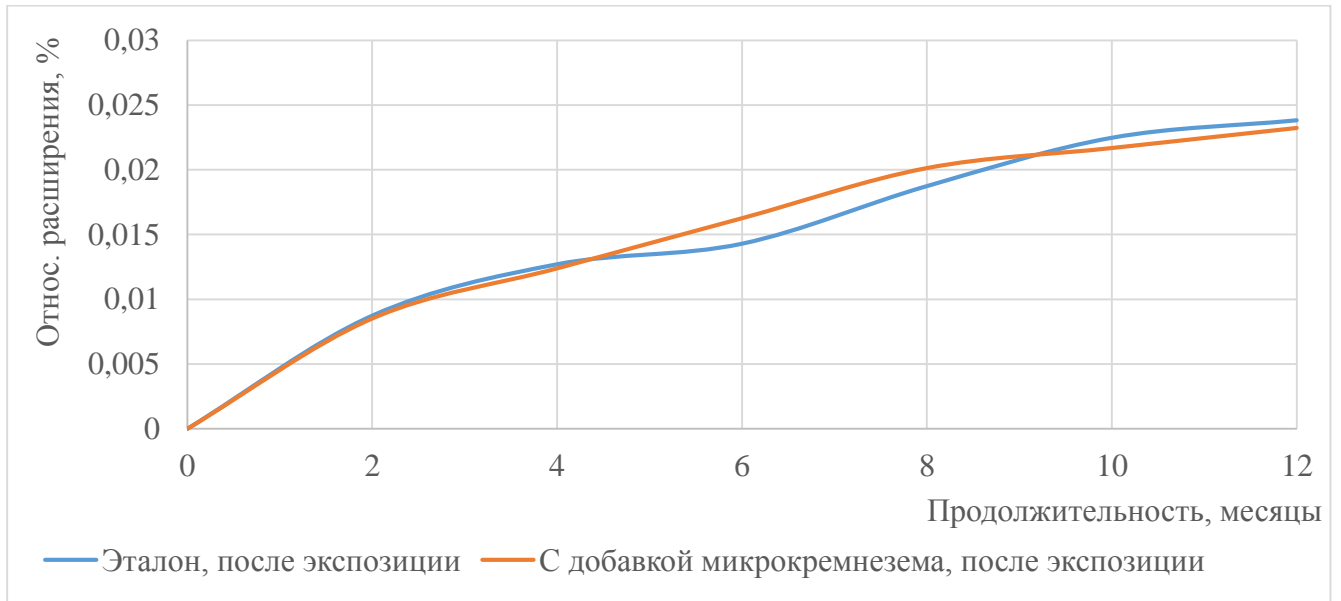


Рисунок 4.14 – Расширения образцов ГПС-бетона, содержащего фракцию ГПС 0,315 – 0,5 мм, выдержанных в нормальных условиях (температуре $20\pm 2^\circ\text{C}$ и 65% относительной влажности) и прошедших экспозицию в климатической камере при температуре 40°C и относительной влажности 100%.

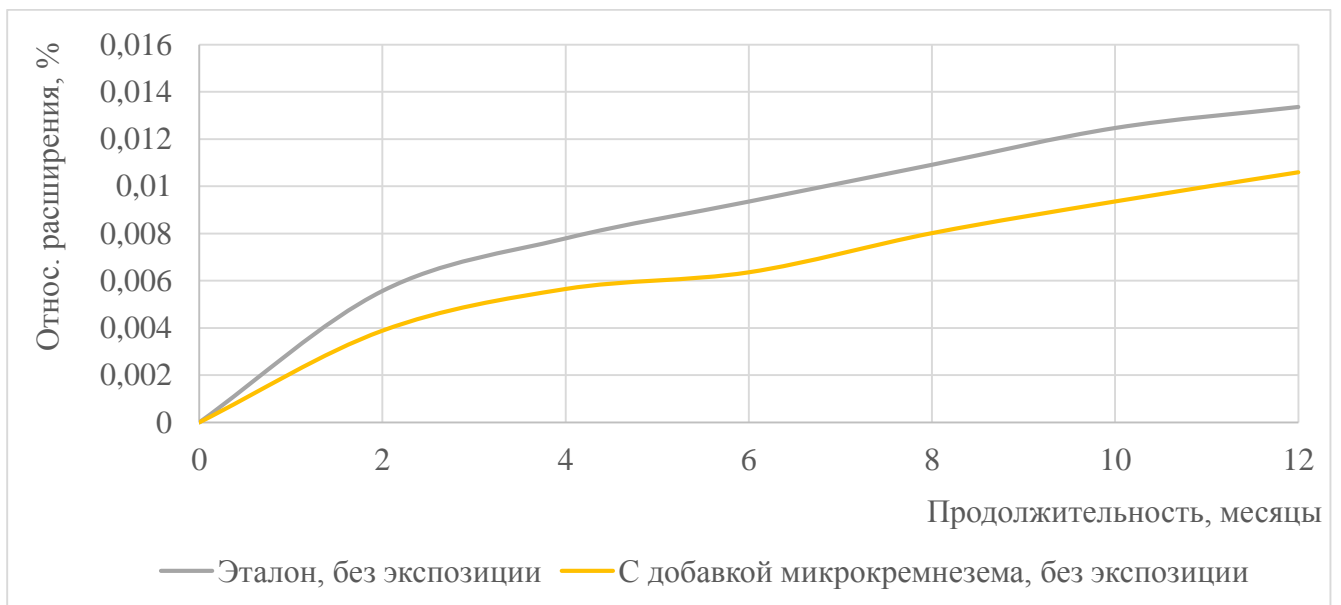


Рисунок 4.15 – Расширения образцов ГПС-бетона, содержащего фракцию ГПС 0,315 – 0,5 мм, выдержанных в нормальных условиях (температуре $20\pm 2^\circ\text{C}$ и 65% относительной влажности) и прошедших экспозицию в климатической камере при температуре 40°C и относительной влажности 100%.

В таблице 4.7 приведены сводные данные по итоговым расширениям образцов после прохождения ускоренных испытаний на расширение бетонных балочек.

Таблица 4.7 – Итоговые расширения образцов после прохождения испытаний на расширение бетонных балочек

Вид испытания	Фракционный размер используемого ГПС	Итоговое отн. расши. образца, %
Экспозиция в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 14 суток	0,16 - 5	0,055
	0,315 - 0,5	0,083
	1,0 - 1,5	0,178
Экспозиции при 40° С и 100% относительной влажности в течение одного года	0,16 - 5	0,025
	0,315 - 0,5	0,024
Экспозиции при 20° С и 65% отн. влажн. в течение года	0,16 - 5	- 0,095
	0,315 - 0,5	0,013
Замена 10 % цемента микрокремнеземом		
Экспозиция в 1М растворе NaOH при 80° С в течение 14 суток	0,16 - 5	0,025 (- 54 %)*
	0,315 - 0,5	0,015 (- 81 %)
	1,0 - 1,5	0,126 (- 29 %)
Экспозиции при 40° С и 100% отн. влажн. в течение года	0,16 - 5	0,011 (- 56 %)
	0,315 - 0,5	0,023 (- 4 %)
Экспозиции при 20° С и 65% отн. влажн. в течение года	0,16 - 5	- 0,074 (- 22 %)
	0,315 - 0,5	0,011 (- 15 %)
* в скобках указано отличие (в процентах) относительного расширения прошедшего данное испытание образца, содержащего микрокремнезем, от аналогичного образца контрольного бездобавочного состава		

Таким образом, в работе образцы, составы которых отличались содержанием

различных пуццолановых добавок, проходили как ускоренные испытания № 3 и № 4, так и некоторые дополнительные испытания на расширение бетонных балочек. Данные испытания образцов симулировали различные условия эксплуатации бетона. Эффективность превентивного действия пуццолановых добавок зависит от их типа и содержания в бетоне. Снижение относительных расширений образцов после прохождения испытаний № 3 и № 4 составляет до 42 % и 32% при использовании золы-уноса, и до 55 % и 65 % при использовании микрокремнезема, соответственно. На основе полученных результатов сделан вывод, что микрокремнезем является наиболее эффективной превентивной мерой против протекания ЩСР в ГПС-бетоне при неблагоприятных условиях его эксплуатации. Данный результат можно объяснить практически 100% реакционной способностью микрокремнезема по сравнению с золой уноса, реакционная способность которой составляет порядка 40%.

Также стоит отметить, что с увеличением плотности стойкость ГПС-бетона к ЩСР возрастает. Более плотная структура цементного камня между гранулами заполнителя значительно затрудняет доступ щелочей к заполнителю, а также позволяет накапливаться гелю исключительно в поровом пространстве ГПС. При менее плотной структуре цементного камня большее количество геля проникает в его поры, что создает в нем внутренние напряжения и значительно увеличивает проявление ЩСР. Зола-унос, имея схожий гранулометрический состав с цементом, может использоваться как наполнитель в бетонах и, помимо своего пуццоланового действия, обеспечивает большую плотность структуры композита. Поэтому использование золы-уноса в качестве дополнительной пуццолановой добавки - наполнителя для ГПС-бетона плотностью более 600 кг/м^3 является рациональной превентивной мерой против протекания ЩСР в «жестких» условиях эксплуатации. При эксплуатации бетона в благоприятных условиях пуццолановые добавки также снижают значения усадок. При этом добавка золы-уноса является наиболее эффективной.

При применении мелкой фракции ГПС для изготовления ГПС-бетона

относительные расширения образцов после прохождения испытаний № 3 и № 4 увеличиваются. Более высокая реакционная способность гранул ГПС меньшего размера, согласно проведенным испытаниям № 3 и № 4, коррелирует с результатами испытания № 2. При этом по итогам прохождения испытания № 3 относительные расширения образцов ГПС-бетона на основе смеси ГПС фракционного размера 1,0 – 1,5 мм превышает допустимый предел расширений, что говорит о недопустимости применения смеси гранулята данного фракционного размера для производства ГПС-бетона. Согласно проведенным испытаниям № 3 и № 4, смесь ГПС фракционного размера 0,315 – 0,5 мм является пригодной для использования в смесях на основе ГПС-бетона. Данная смесь может применяться в теплоизоляционных штукатурках и кладочных растворах.

4.4 Микроструктурные исследования образцов после прохождения испытаний

Для более глубокого анализа эффективности различных превентивных мер в работе проводились дополнительные микроструктурные исследования модифицированных образцов после испытания № 3 и № 4.

В работе сравнивалась микроструктура образцов контрольных составов ГПС-бетона, а также составов, модифицированных пуццолановыми добавками. В качестве пуццолановой добавки был выбран микрокремнезем, как наиболее эффективная добавка для подавления ЩСР. Микрокремнезем вводился в бетон в качестве 10 % замены цемента.

На рисунке 4.16 представлено сравнение микроструктуры прошедших ускоренное испытание № 3 на расширение бетонных балочек в 1М растворе NaOH при 80 °С в течение 14 суток образцов ГПС-бетона: контрольного бездобавочного состава и с заменой 10% цемента микрокремнеземом. Содержание Na_2O_e в цементе составляло 0,86. Особенности микроструктурного проявления ЩСР были

рассмотрены в главе 3. Как видно по микрофотографиям, в образцах обоих составов наблюдаются существенные проявления ЦСР, однако при использовании пуццолоановой добавки степень деструкции снижается.

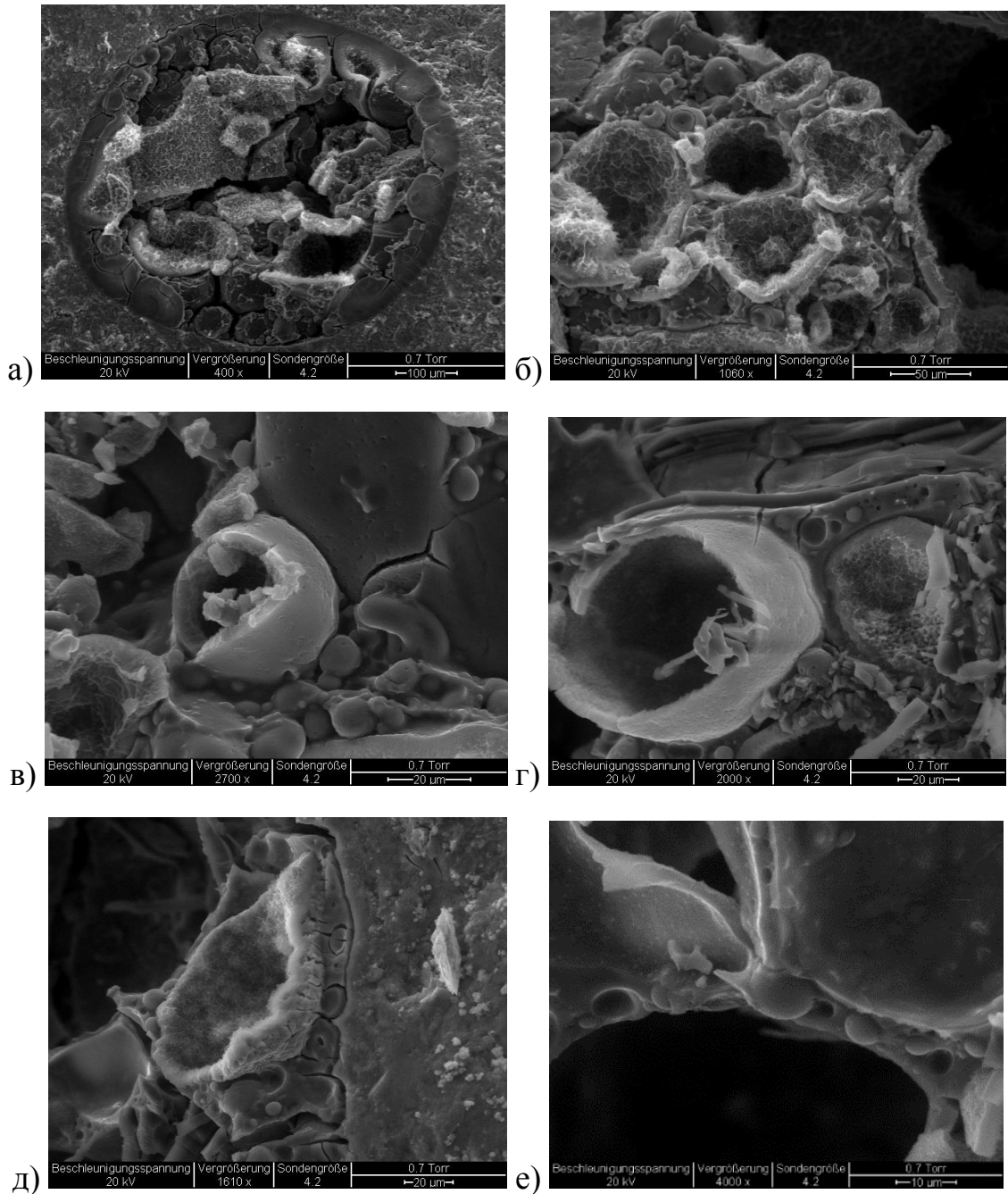


Рисунок 4.16 – Результаты микроструктурного исследования структуры ГПС-бетона после 14-суточной экспозиции в 1М растворе NaOH при 80 °С, образцов: а, б, в – контрольного состава; г, д, е – с добавкой микрокремнезема (замена 10% по масс. цем.).

На рисунке 4.17 представлены результаты микроструктурного анализа прошедших испытание № 4 - экспозицию в климатической камере при температуре 40° С и относительной влажности 100% образцов ГПС-бетона: контрольного бездобавочного состава и с заменой 10% цемента микрокремнеземом. Структура образца контрольного состава имеет выраженные разрушения, а в его порах наблюдаются обильные образования силикатного гидрогеля. По сравнению с ним, в образце, содержащим микрокремнезем, наблюдается более целостная структура гранул и меньшее количество образованного гидрогеля.

На рисунке 4.18 представлена микроскопия образца ГПС-бетона после выдерживания при нормальных условиях температуре 20 °С и относительной влажности 60%, а также после экспозиции в климатической камере при температуре 40 °С и относительной влажности 100% в течение года. Как видно, температурно-влажностный режим способствует ускорению протекания химических процессов в теле бетона и большим различиям между состоянием структуры экспонированного и неэкспонированного образцов. При наличии микрокремнезема в составе ГПС-бетона данные различия становятся менее выраженными, что доказывает эффективность его применения.

Согласно проведенным испытаниям, использование низкощелочного цемента не является эффективной превентивной мерой в неблагоприятных условиях эксплуатации ГПС-бетона, симулируемом испытанием № 3. Поэтому в работе проводились микроструктурные исследования прошедших испытание № 4 образцов ГПС-бетона с различным содержанием щелочей в составе. На рисунке 4.19 представлены результаты микроструктурного исследования экспонированных в климатической камере при температуре 40 °С и относительной влажности 100% в течение года образцов ГПС-бетона с различным содержанием щелочей в составе по Na_2O_e : 0,48, 0,86 и 2,58. Как видно, при данных условиях степень деструкции заполнителя прямопропорциональна содержанию щелочей в бетоне. Максимальные разрушения наблюдаются при наивысшем содержании щелочей при $\text{Na}_2\text{O}_e=2,58$.

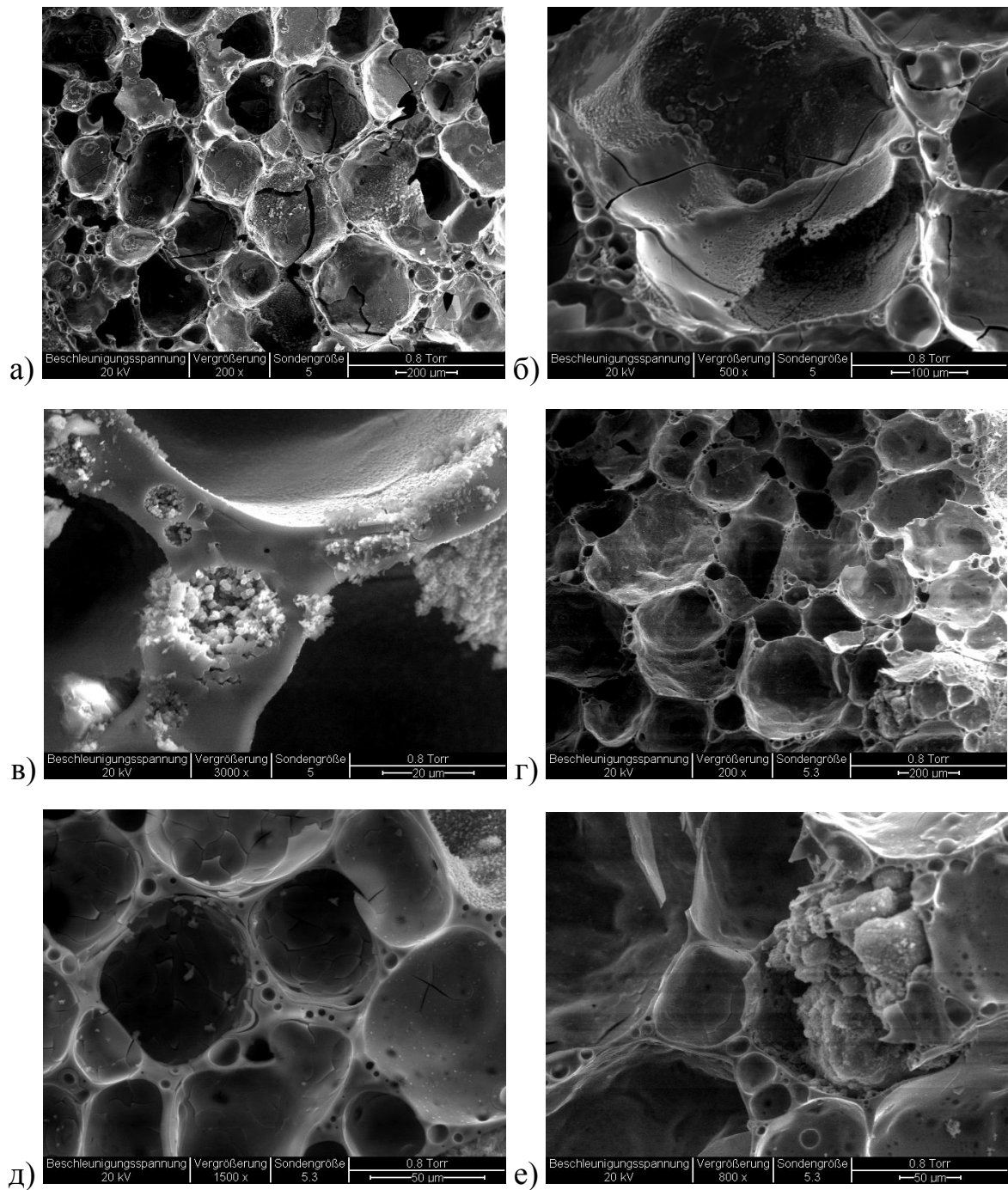


Рисунок 4.17 – Результаты микроструктурного исследования структуры ГПС-бетона после экспозиции в климатической камере при температуре 40°C и относительной влажности 100 %, образцов: а, б, в – контрольного состава; г, д, е – с добавкой микрокремнезема (замена 10% по масс. цем.).

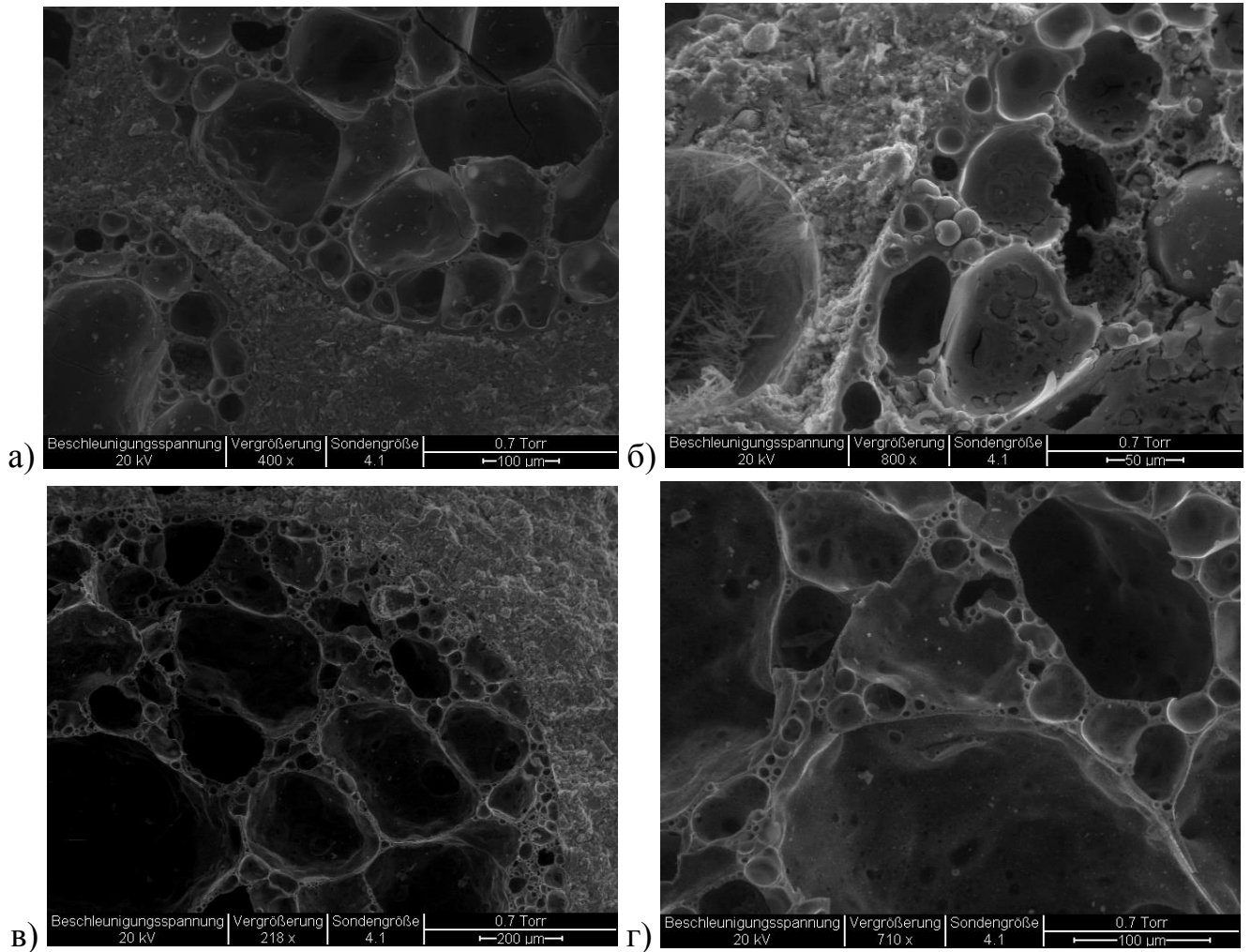


Рисунок 4.18 – Результаты микроструктурного исследования образцов ГПС-бетона: а, б – контрольного состава; в, г – с заменой 10% цемента микрокремнеземом, выдержанных: а, в – при нормальных условиях температуре 20 °С и относительной влажности 60 %; б, г – в климатической камере при температуре 40 °С и относительной влажности 100%.

На рисунке 4.20 представлена микроскопия образца ГПС-бетона на основе смеси ГПС фракционного размера 0,315 – 0,5 мм после экспозиции в климатической камере при температуре 40 °С и относительной влажности 100% в течение года. Как видно, также наблюдаются некоторые деструкции заполнителя, однако структура композита остается целостной.

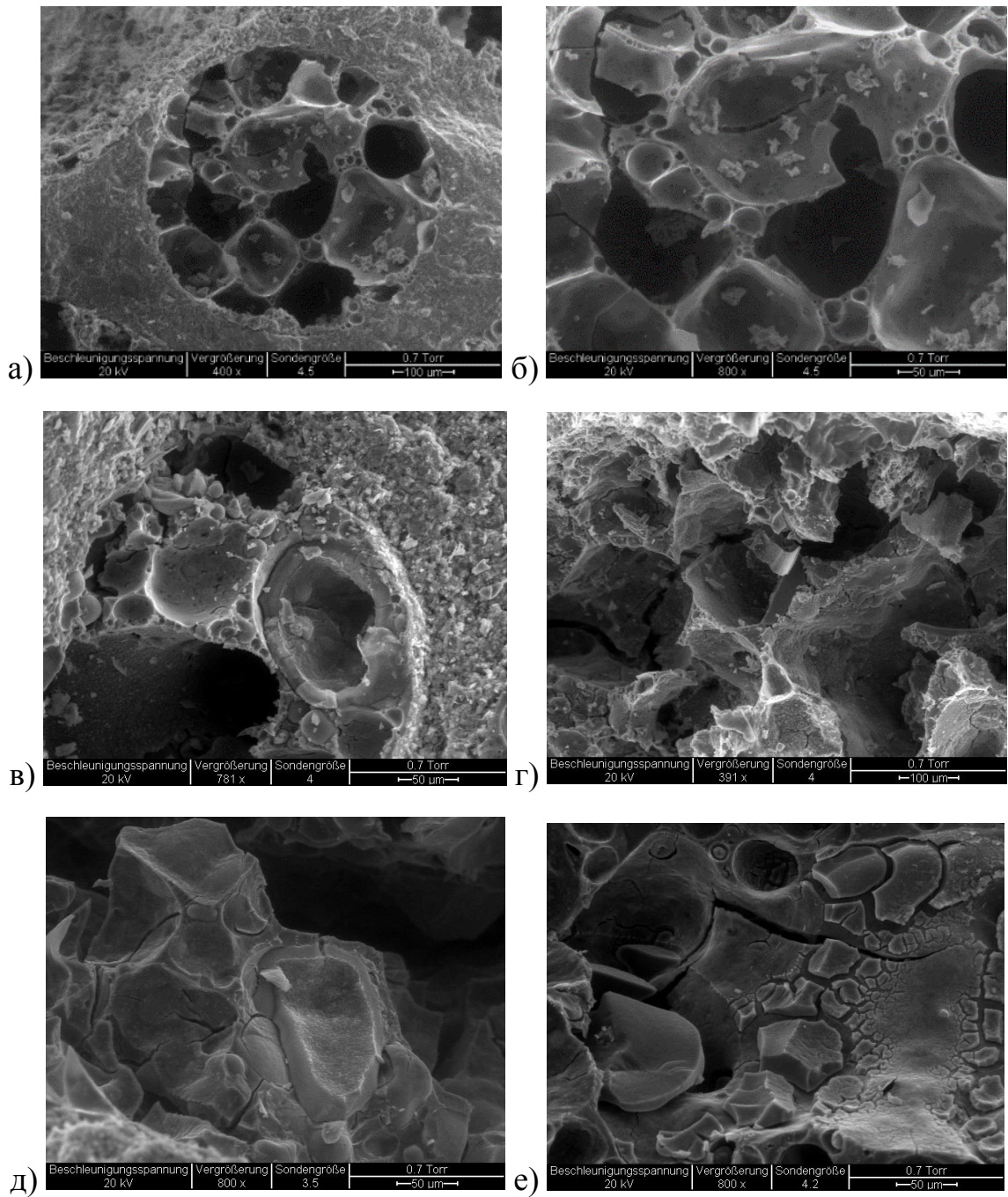


Рисунок 4.19 – Результаты микроструктурного исследования образцов ГПС-бетона с содержанием в составе щелочей, по Na_2O_e : а, б - 0,48; в, г – 0,86; д, е – 2,58; после экспозиции в климатической камере при температуре 40 °С и относительной влажности 100% в течение года.

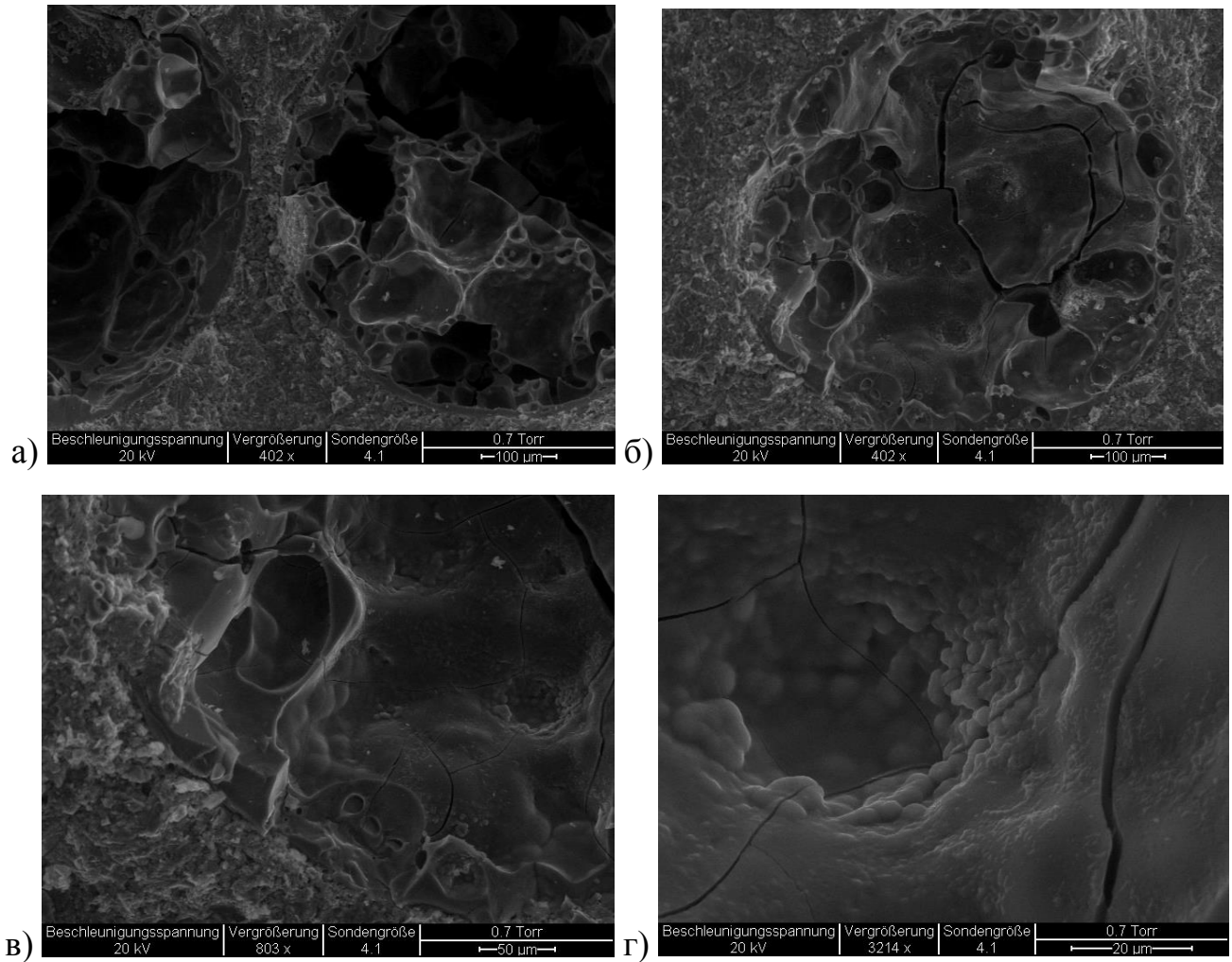


Рисунок 4.20 – Результаты микроструктурного исследования образцов ГПС-бетона, содержащих смесь ГПС фракции 0,315 – 0,5 мм, после экспозиции в климатической камере при температуре 40 °С и относительной влажности 100% в течение года.

Таким образом, в работе исследовалась микроскопия образцов ГПС бетона после прохождения различных испытаний: испытания № 3 на выдерживание образцов в 1М растворе NaOH при температуре 80° С в течение 14-суток, испытание № 4 на выдерживание образцов при 40° С и 100% относительной влажности в течение одного года, а также дополнительное испытание на выдерживание образцов при температуре 20 °С и 65 % относительной влажности. При этом различные испытания симулировали различные условия эксплуатации ГПС-бетона. Так как согласно испытаниям на расширение бетонных балочек

добавка микрокремнезема показала наилучшую ингибирующую активность, в работе была исследована микроструктура образцов, в которых 10 % цемента было замещено микрокремнеземом. Полученные результаты микроструктурных исследований коррелируют с результатами испытаний на расширение бетонных балочек.

Силикатный гидрогель формируется и распределяется в поровом пространстве заполнителя, и внутренние напряжения и расширения не возникают до тех пор, пока значительная часть порового пространства пеностекла не заполнится продуктами реакции. Согласно микроструктурному исследованию, в образцах, модифицированных пуццолановыми добавками по сравнению с контрольными составами наблюдается улучшение однородности межфазной зоны «заполнитель – цементный камень», сокращение числа усадочных трещин стенок пор гранулы и уменьшение объема образованного силикатного гидрогеля после прохождения испытания. На примере микрокремнезема сделан вывод, что превентивные пуццолановые добавки сокращают объем образованного геля и увеличивают долговечность ГПС-бетона.

Также стоит отметить, что степень разрушения заполнителя вследствие ЩСР находится в прямой зависимости от количества щелочей в бетоне. При этом образцы, в которых содержание щелочей по Na_2O_e было более двух показывают сильные деструкции и являются нежелательным при использовании в ГПС-бетоне.

4.5 Влияние протекания ЩСР на физико-механические и теплофизические свойства ГПС-бетона

В работе исследовалось влияние ЩСР на физико-механические и теплофизические свойства ГПС-бетонов. Для этого образцы ГПС-бетона различного состава проходили годовую экспозицию в климатической камере при температуре 40 °С и 100 % относительной влажности (испытание № 4), после чего

их показатели прочности и теплопроводности сравнивались с контрольными образцами, выдержанными такой же срок при нормальных условиях: температуре 20 °С и 60 % относительной влажности. Как уже отмечалось выше, экспозиция в климатической камере ускоряет протекание химических процессов в теле бетона. Таким образом, по истечению одного года проведения испытания можно судить о состоянии бетона к концу срока эксплуатации, а также сравнить его с состоянием бетона в начале срока эксплуатации. Результаты показали, что теплопроводность образцов практически не изменяется после проведения эксперимента. В свою очередь, прочность образцов, экспонированных в климатической камере, в зависимости от состава бетона снижалась по сравнению с образцами, выдержанными при нормальных условиях.

На рисунке 4.21 представлены результаты измерения прочности на сжатие образцов ГПС-бетона с различным содержанием щелочей в составе после прохождения испытаний. Пониженное содержание щелочей достигалось применением низкощелочного цемента с $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,48$. Повышенное содержание щелочей (Na_2O_e равное 1,72 и 2,56) достигалось дополнительным введением каустической соды в воду затворения. Как видно, при увеличении содержания щелочей (Na_2O_e) с 0,48 до 2,58, прочность образцов понижается. Прочность прошедших экспозицию в климатической камере образцов снизилась с 3,13 до 1,71, а выдержанных в нормальных условиях: с 4,52 до 2,55 МПа. При этом снижение прочности образцов после экспозиции в климатической камере по сравнению с прочностью образцов, выдержанных в нормальных условиях, при применении цементов с низким содержанием щелочей составляет до 20 %. При более высоком содержании щелочей в бетоне снижение прочности увеличивается до 35 %.

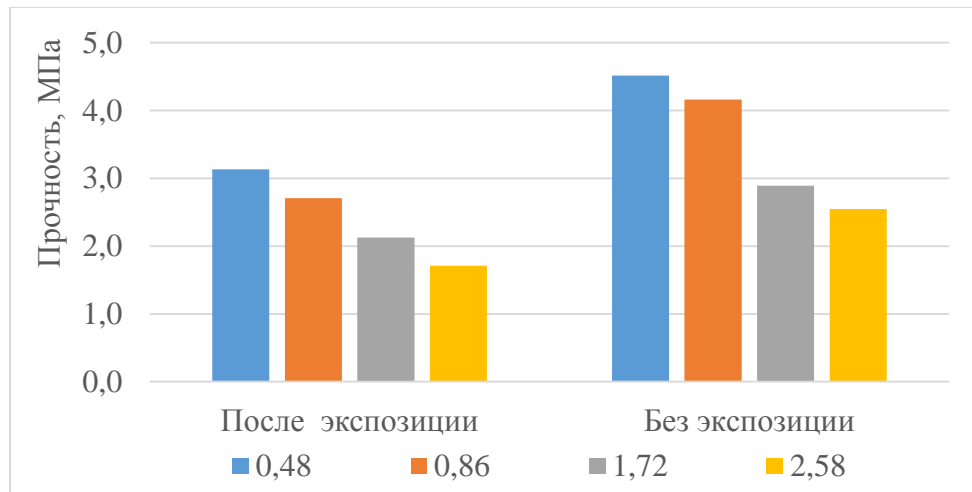


Рисунок 4.21 – Прочностные характеристики образцов ГПС-бетона с применением цементов с различным содержанием щелочей, прошедших экспозицию в климатической камере при температуре 40° С и относительной влажности 100% и выдержанных в нормальных условиях (температуре 20±2° С и 65% относительной влажности).

Аналогичным образом сравнивалась между собой эффективность применения используемых в работе превентивных мер: цемента с низким содержанием щелочей, а также пуццолановых добавок различного вида и содержания. На рисунке 4.22 представлены результаты испытания прочности на сжатие образцов ГПС-бетона различного состава после выдерживания в климатической камере, а также при нормальных условиях. Наибольшее снижение прочности на 34% наблюдается в образцах контрольного состава, в котором применялся цемент с $\text{Na}_2\text{O}_e=0,86$. При использовании низкощелочного цемента с $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,48$ снижение прочности сокращается до 20%. При использовании золуноса сокращение прочности составляет порядка 20% и 25%, для замещения 30% цемента золой-уноса и 30% добавкой золы-уноса по массе цемента, соответственно. При 10% замещении цемента микрокремнеземом сокращение прочности образцов после выдерживания в климатической камере практически не наблюдается и составляет не более 5%.

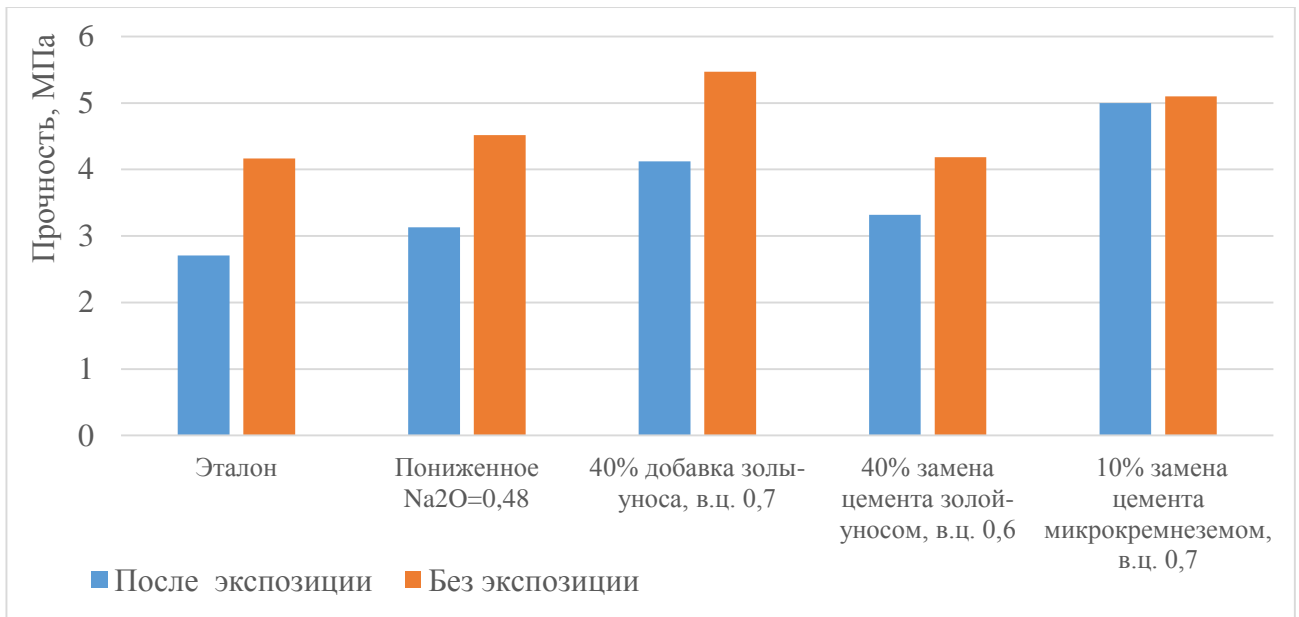


Рисунок 4.22 – Прочностные характеристики образцов ГПС-бетона: образцов контрольного состава и образцов с применением превентивных мер. Половина образцов прошла экспозицию в климатической камере при температуре 40° С и относительной влажности 100%, другая половина была выдержана при нормальных условиях (температуре 20±2° С и 65% относительной влажности).

Плотность образцов для прохождения испытания составляла порядка 700 ± 50 кг/м³. При 40% добавке золы-уноса плотность бетона была увеличена до 800 кг/м³ с увеличением прочности на 17%. Результаты измерения плотности образцов представлены рисунке 4.23. После выдерживания в климатической камере плотность высушенных до постоянной массы образцов сравнивалась с плотностью образцов, выдержанных при нормальных условиях. Плотности образцов контрольного состава, образца с применением цемента с низким содержанием щелочей, а также образцов с применением золы-уноса увеличиваются, в среднем, на 5 – 7%. Увеличение плотности образца, в котором 10% цемента было замещено микрокремнеземом, составило 2%.

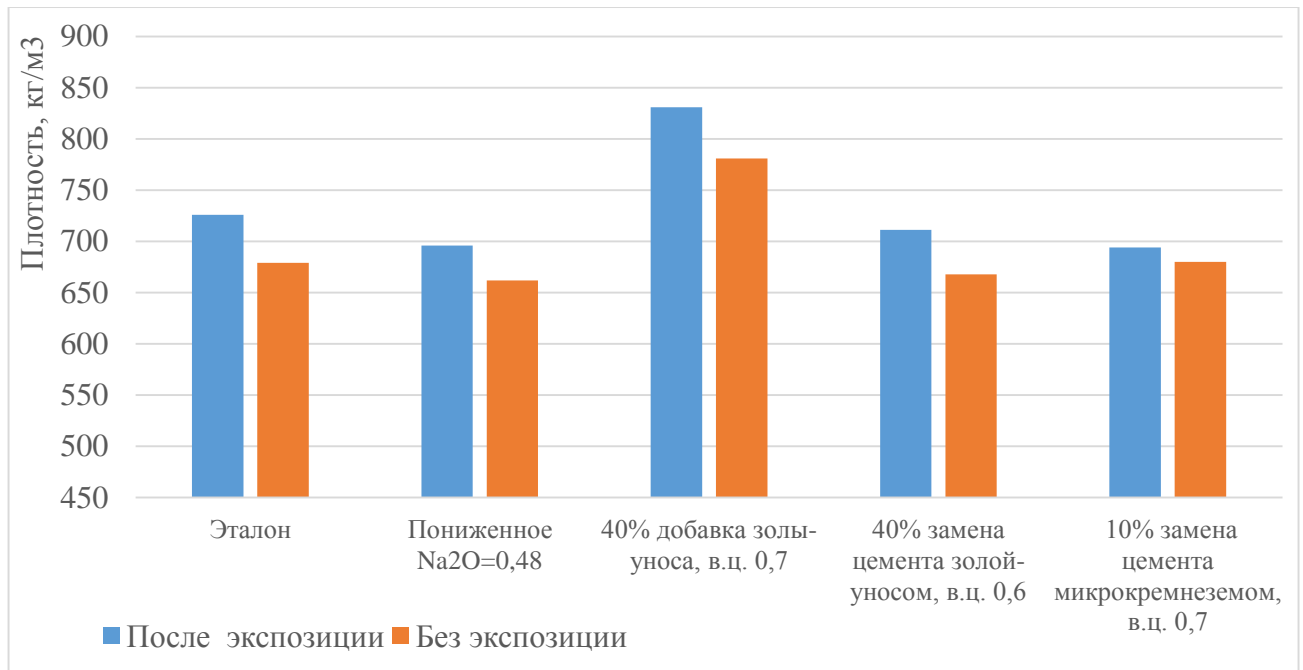


Рисунок 4.23 – Плотность образцов ГПС-бетона: образцов контрольного состава и образцов с применением превентивных мер. Половина образцов прошла экспозицию в климатической камере при температуре 40° С и относительной влажности 100%, другая половина была выдержана при нормальных условиях (температуре 20±2° С и 65% относительной влажности).

В работе также исследовалось влияние протекания ЩСР на физико-механические свойства ГПС-бетона на основе мелкой фракции ГПС. Для изготовления образцов использовалась смесь ГПС фракционного размера 0,315 – 0,5 мм. Для исследования влияния пуццолановых добавок на протекание ЩСР в ГПС-бетонах на основе мелкой фракции ГПС часть образцов была модифицирована 10% замещением цемента микрокремнеземом. Микрокремнезем был выбран как наиболее эффективная добавка для подавления ЩСР в ГПС-бетоне. На рисунках 4.24 «а» и «б» представлены результаты измерения прочности и плотности данных образцов после прохождения испытаний. Как видно, при использовании мелкой фракции ГПС прочность и плотность бетона значительно возрастает по сравнению с составами на основе ранее используемой фракции 0,16 – 5 мм и достигает до 12,25 МПа и 1240 кг/м³, соответственно. При использовании

микрокремнезема прочность бетона возрастает на 12%. В данных образцах ГПС-бетона вследствие протекания ЩСР наблюдаются изменения физико-механических характеристик. Снижения прочности составляют 0,9% и 4,2%, плотности: 1,0% и 2,6% для контрольного и модифицированного микрокремнеземом образцов.

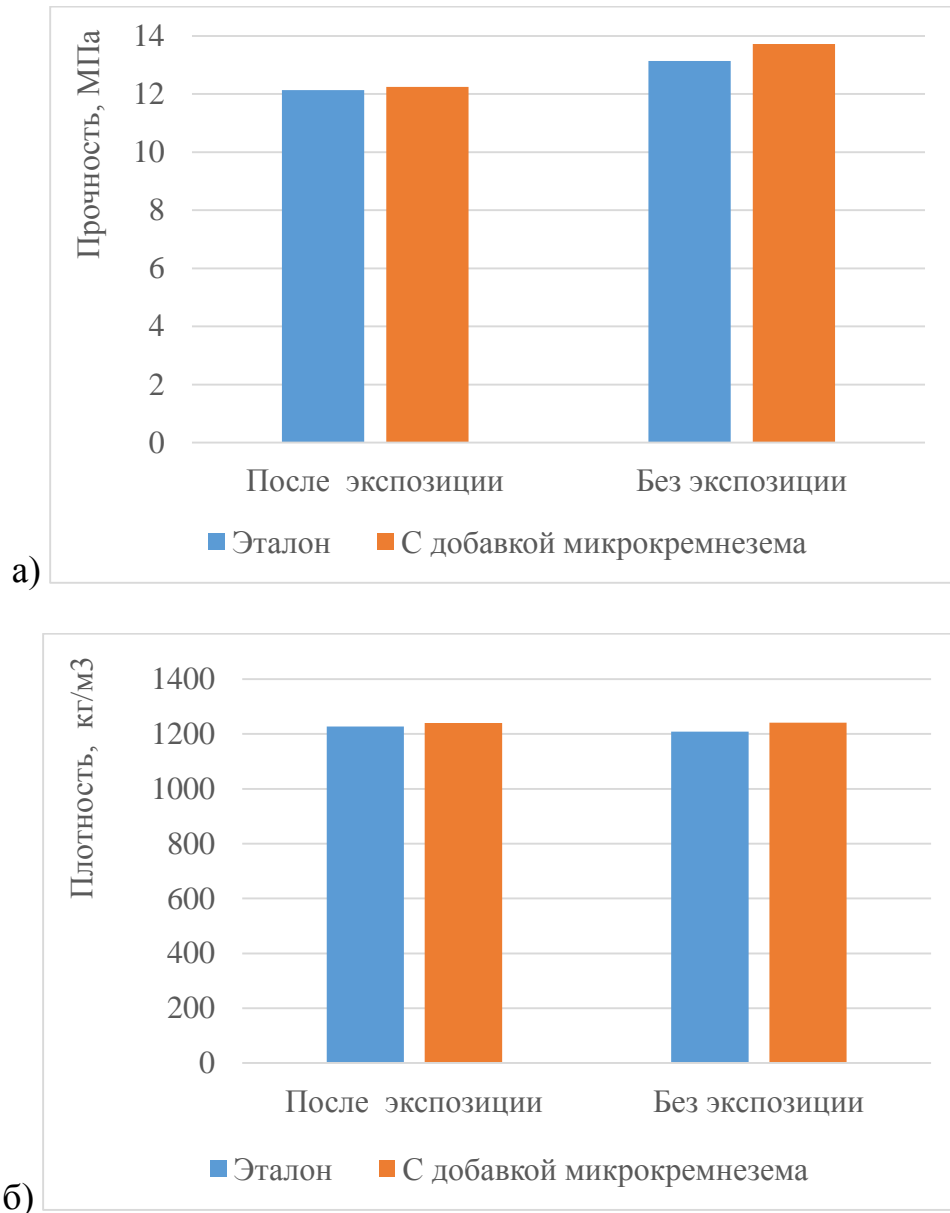


Рисунок 4.24 – а – Прочность, б – плотность образцов ГПС-бетона, содержащих мелкую фракцию ГПС 0,315 – 0,5 мм, прошедших экспозицию в климатической камере при температуре 40°С и относительной влажности 100%, а также выдержанных при нормальных условиях: температуре 20±2°С и 65% относительной влажности.

В таблице 4.8 приведены сводные данные по итоговым значениям прочности и плотности образцов после прохождения испытаний.

Таблица 4.8 – Сравнения результатов измерения прочности и плотности образцов после их хранения в течение года при различных условиях

Условия выдерживания образцов Состав	Темп. 20 °С отн. влажн. 65 %; 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	34,86	6,92
Пуццолановая добавка: 10 % замена цемента микрокремнеземом, В/Ц 0,7	5,09 / 680	4,99 / 694	1,97	2,06
Пуццолановая добавка: 30 % добавка золы-уноса, В/Ц 0,7	4,52 / 781	3,31 / 831	26,29	6,40
Пуццолановая добавка: 30% замена цемента золой-уноса, В/Ц 0,6	5,47 / 668	4,13 / 711	26,77	6,44
Цементы с пониженным Na ₂ O _e =0,48–0,62	4,18 / 662	3,32 / 696	24,49	5,14
Повышенное Na ₂ O _e = 1,72–2,02	2,89 / 645	2,13 / 692	20,57	7,29
Повышенное Na ₂ O _e = 2,58–3,03	2,55 / 639	1,71 / 687	32,94	7,51
Фракция ГПС 0,315 – 0,5 мм	12,25 / 1226	12,14 / 1239	0,89	1,03
Фракция ГПС 0,315 – 0,5 мм, 10% замена цемента микрокремнеземом	13,72 / 1209	13,14 / 1240	4,21	2,57

Таким образом, основные последствия ЩСР в ГПС-бетонах заключаются в деструкции заполнителя по причине образования в его порах силикатного гидрогеля под действием щелочей цемента и щелочей из внешней среды. При этом, цементная матрица композита остается целостной, а гранулы изолированными друг от друга. Теплопроводность легкого бетона обуславливается количеством газовой фазы в порах заполнителя, объем которой незначительно изменяется в процессе протекания ЩСР в ГПС-бетоне. Поэтому значения теплопроводности образцов при ускорении протекания химических процессов в теле бетона в процессе проведения испытания претерпели незначительные изменения.

В то же время при протекании ЩСР в ГПС-бетоне наблюдаются как деструкции заполнителя, снижающие прочностные показатели образцов, так и образования силикатных гидрогелей в порах ГПС, сорбирующих поступающую из внешней среды влагу и увеличивающих плотность бетона. В зависимости от состава экспонированных образцов наблюдается снижение их прочности на 20–35 % и увеличение плотности на 2–8 % по сравнению с неэкспонированными контрольными образцами. Данные изменения физико-механических параметров можно отнести к негативному проявлению щелочной коррозии при ускорении химических процессов в теле бетона при выдерживании образцов в климатической камере.

Согласно проведенным исследованием влияния ЩСР на физико-механические свойства ГПС-бетона можно сделать вывод, что эффективность превентивного действия при применении цемента с низким содержанием щелочей сравнима с применением пуццолановой добавки низкой реакционной активности – золой уноса. При возрастании реакционной активности пуццолановой добавки разница в прочности и плотности экспонированных и неэкспонированных в климатической камере образцов сокращается. На основании этого можно сделать вывод о лучшей эффективности микрокремнезема к подавлению ЩСР в ГПС-бетоне.

При использовании в ГПС-бетоне смеси ГПС мелкой фракции 0,315 – 0,5 мм снижение прочности и прирост плотности после прохождения испытания сокращается по сравнению с контрольным составом на основе фракции 0,16 – 5 мм и составляет не более 1%. Прирост плотности при использовании пуццолановых добавок также сокращается и составляет порядка 12%. На основе полученных данных можно сделать вывод о достаточной стойкости ГПС-бетона к ЩСР на основе мелкой фракции не более 0,5 мм и отсутствии необходимости в применении пуццолановых добавок.

4.6 Изучение механизма превентивного действия пуццолановых добавок в ГПС-бетонах

На основе полученных результатов исследований сделан вывод о том, что наиболее эффективными для подавления ЩСР в ГПС-бетонах являются пуццолановые добавки. При этом эффективность их превентивного действия зависит от реакционной активности добавки. В работе наиболее эффективной показала себя добавка микрокремнезема, вводимая в бетон в виде 10% замены цемента по массе. Далее в работе исследовался механизм действия микрокремнезема на протекание ЩСР в ГПС-бетонах.

Как показывают дополнительно проведенные эксперименты, содержание вовлеченного воздуха в свежей смеси ГПС-бетона при применении микрокремнезема сокращается с 13% до 11,5%. На рисунке 4.25 представлено ультразвуковое исследование свежей смеси ГПС-бетона. Как видно, начальное время схватывания ГПС-бетона, содержащего смесь ГПС фракционного размера 0,315 – 0,5 мм при В/Ц 0,6 составляет около 6 часов после приготовления. При применении микрокремнезема время схватывания сокращается в два раза.

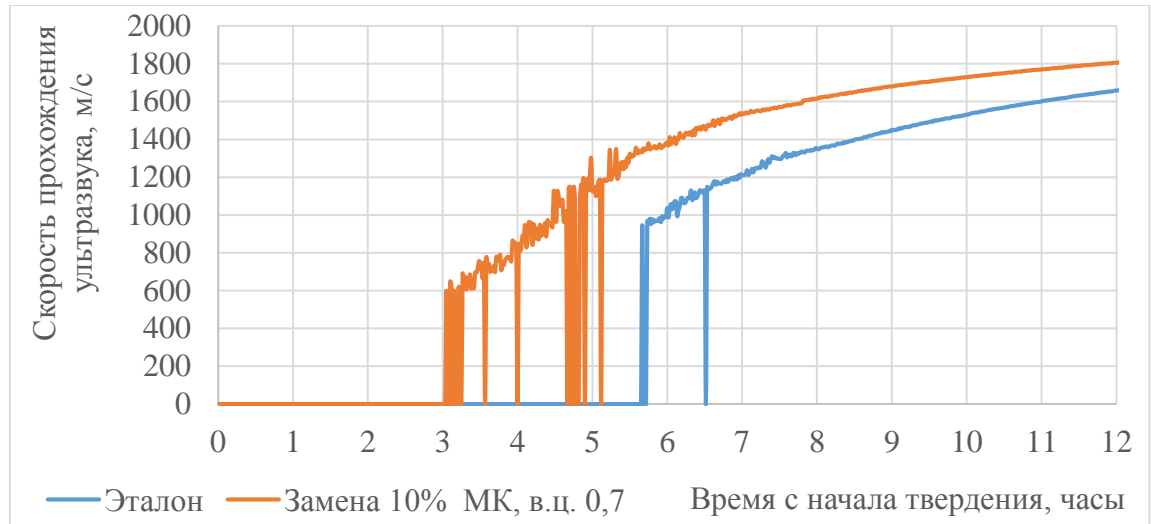


Рисунок 4.25 – Ультразвуковое исследование свежеприготовленной смеси ГПС-бетона на время начального схватывания. Резкий скачок скорости прохождения ультразвуковых волн сквозь тело бетона отображает момент начала схватывания композита.

На рисунке 4.26 представлены результаты измерения прочности образцов ГПС-бетона: контрольного состава, а также модифицированных микрокремнеземом, в возрасте 7, 28, а также 84 суток. Как видно, образцы как контрольного, так и модифицированного составов к первым семи суткам твердения набирают до 95% прочности. По сравнению с контрольным составом, при применении микрокремнезема в этот период наблюдается ранний прирост прочности бетона. На 28-ые сутки прочность модифицированного ГПС-бетона составляет на 25% выше прочности образцов контрольного состава.

На рисунке 4.27 представлены результаты порометрического исследования образцов ГПС-бетона: контрольного состава, а также модифицированных микрокремнеземом. Для этого применялась ртутная порометрия. Анализировался объем пор различного диаметра из диапазона 0,16–100 мкм. Как видно, основной объем пор из данного не превышает диаметр 3 мкм. Как видно, применение микрокремнезема способствует снижению максимального количества пор с 387 мм³/г до 321 мм³/г. При этом общий объем пор при 10% замене цемента

микрокремнеземом по сравнению с образцом контрольного состава снижается на 16%.

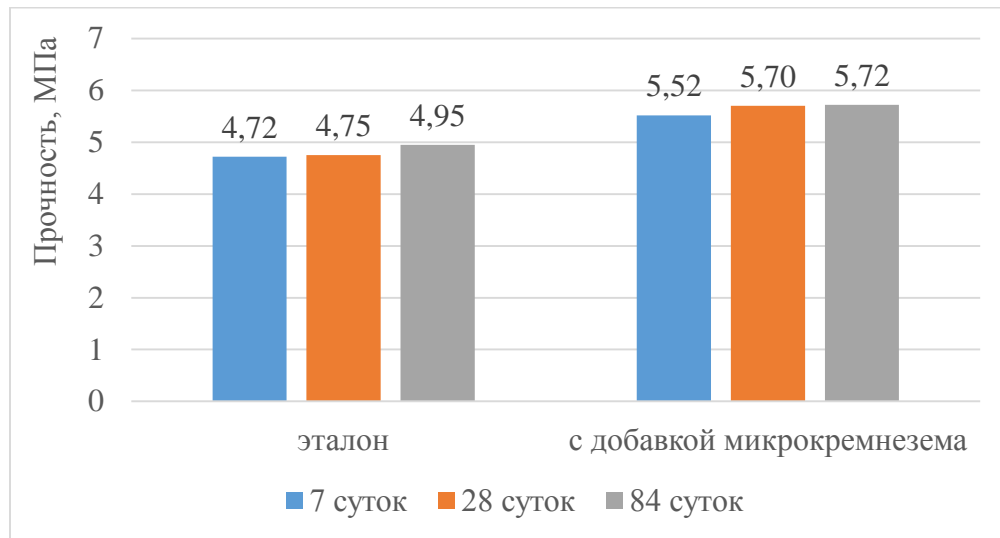


Рисунок 4.26 – Динамика набора прочности образцов ГПС-бетона: контрольного состава, а также модифицированных микрокремнеземом.

Для изучения влияния пуццолановых добавок на структурные преобразования в теле ГПС-бетона в работе проводился количественный минералогический анализ ГПС-бетона по методу Ритвельда. Исследовались образцы ГПС-бетона как контрольного состава, так и образцы, модифицированные микрокремнеземом. Для изготовления образцов применялся цемент с обычным содержанием щелочей $\text{Na}_2\text{O}_e=0,86$. Часть образцов выдерживалась в нормальных условиях при температуре 20 °С и относительной влажности 60%, другие образцы прошли экспозицию в климатической камере при температуре 40 °С и относительной влажности 100%. Результаты исследований представлены на рисунках 4.28, 4.29, 4.30 и 4.31. Согласно предложенной методике, минералогический состав бетона после выдерживания в нормальных условиях в течение года соответствует бетону в начале срока эксплуатации, соответственно после выдерживания в климатической камере – к концу срока его эксплуатации. По результатам исследования заключался вывод о структурных преобразованиях в теле бетона в течение эксплуатации.

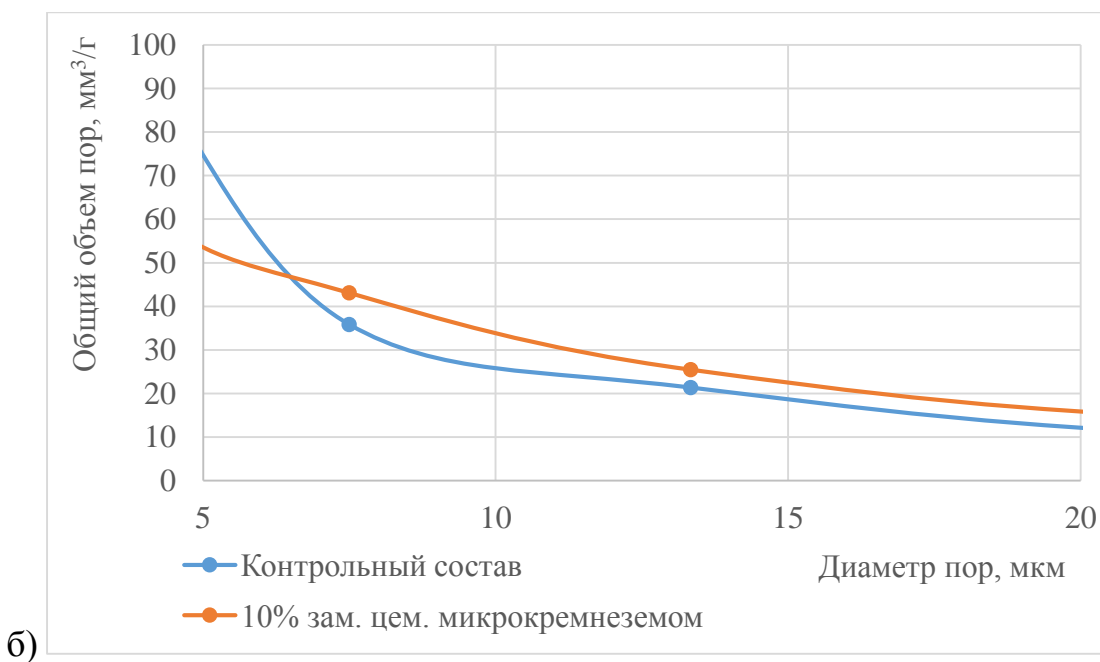
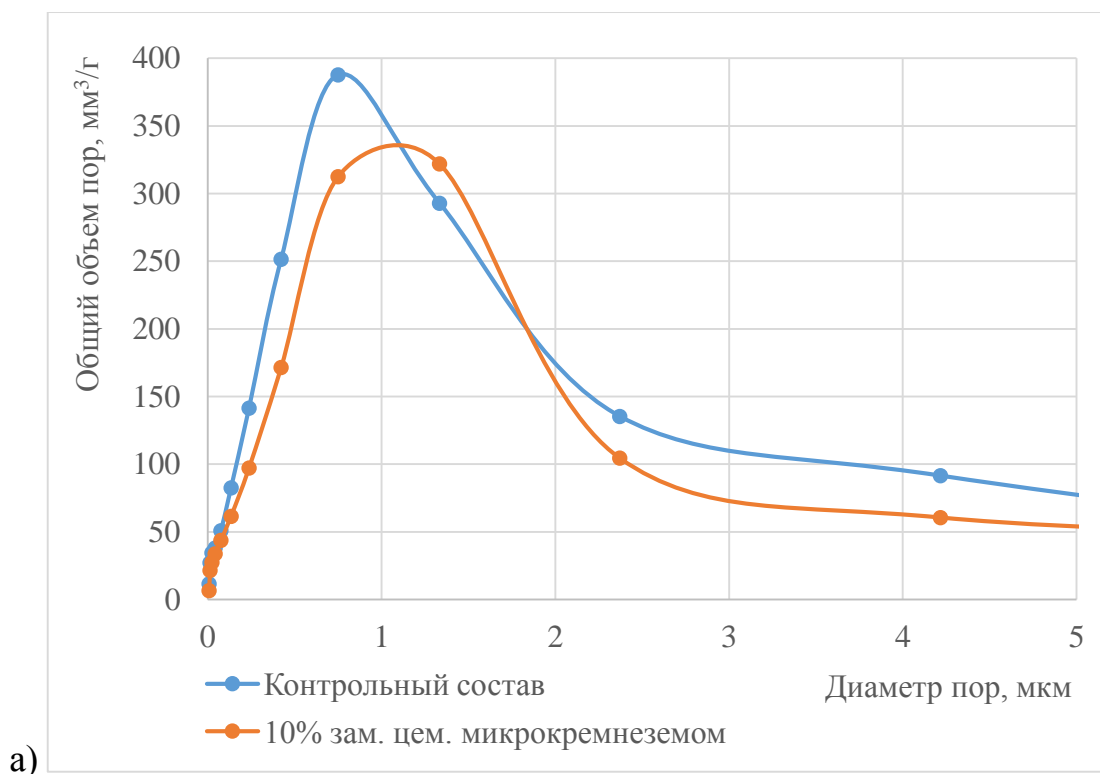


Рисунок 4.27 – Зависимость общего объема пор от состава ГПС-бетона в диапазоне: а – 0,16–5 мкм; б – 5–20 мкм.

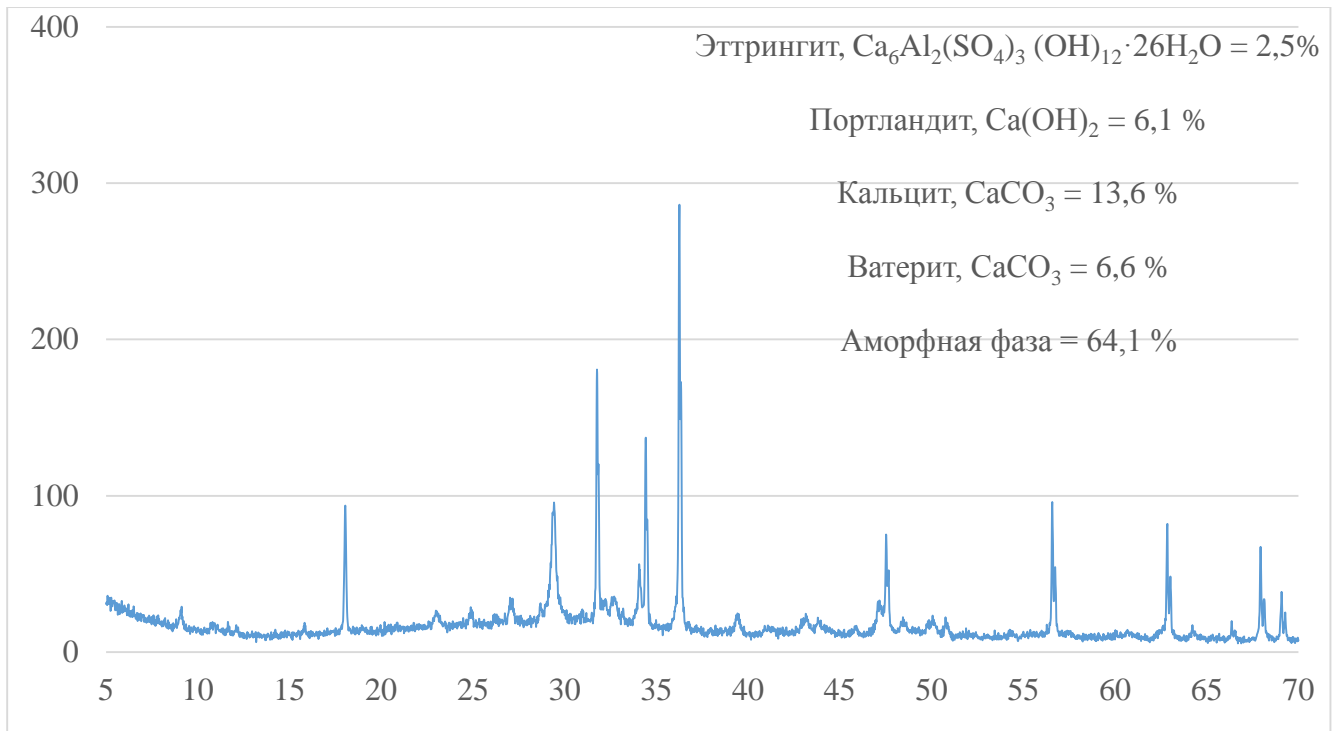


Рисунок 4.28 – Рентгеновская дифрактограмма образца контрольного состава, выдержанного в нормальных условиях при температуре 20° С и 60% относительной влажности в течение одного года.

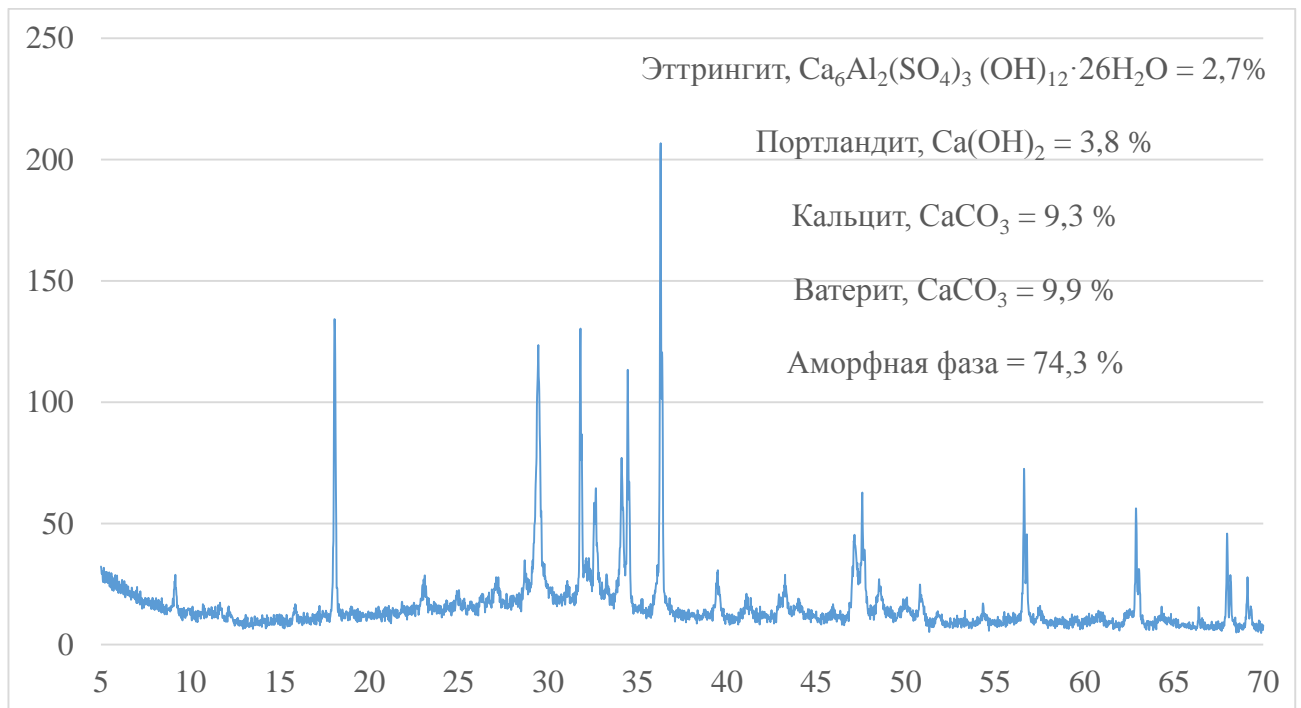


Рисунок 4.29 – Рентгеновская дифрактограмма образца с заменой 10% цемента микрокремнеземом, выдержанного в нормальных условиях при температуре 20° С и 60% относительной влажности в течение одного года.

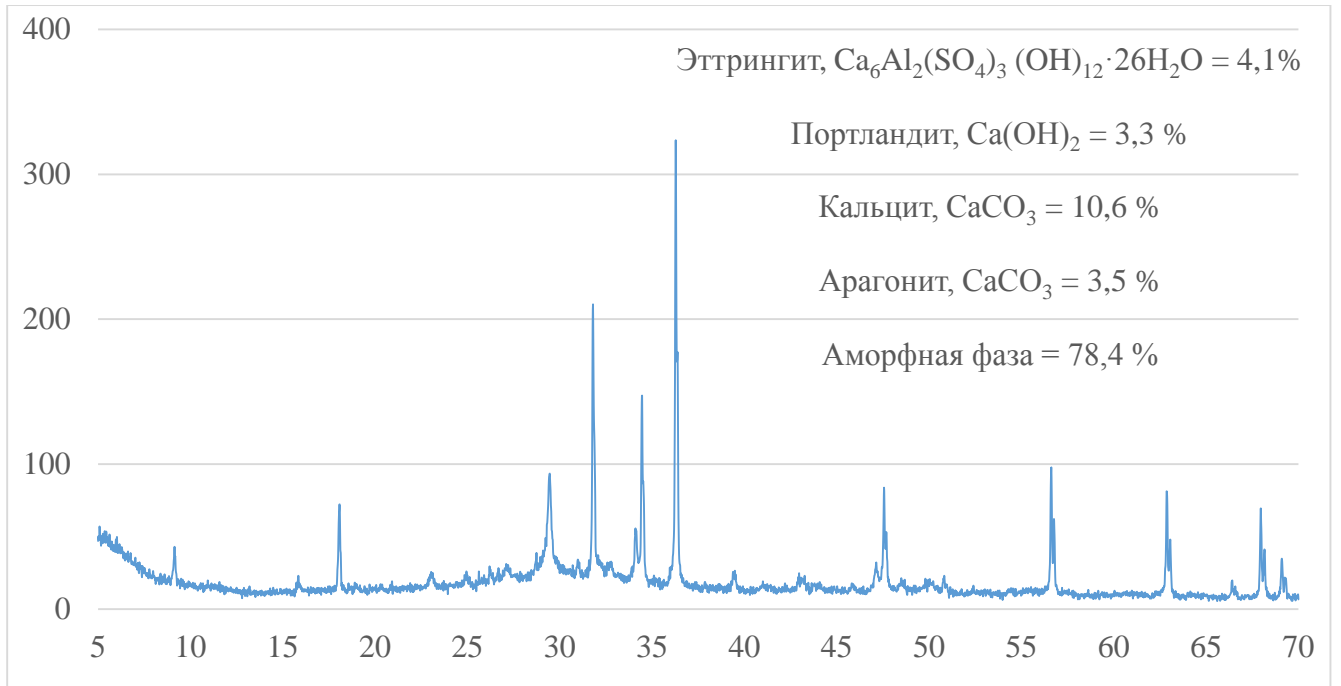


Рисунок 4.30 – Рентгеновская дифрактограмма образца контрольного состава, выдержанного в климатической камере при температуре 40° С и 100% относительной влажности в течение одного года.

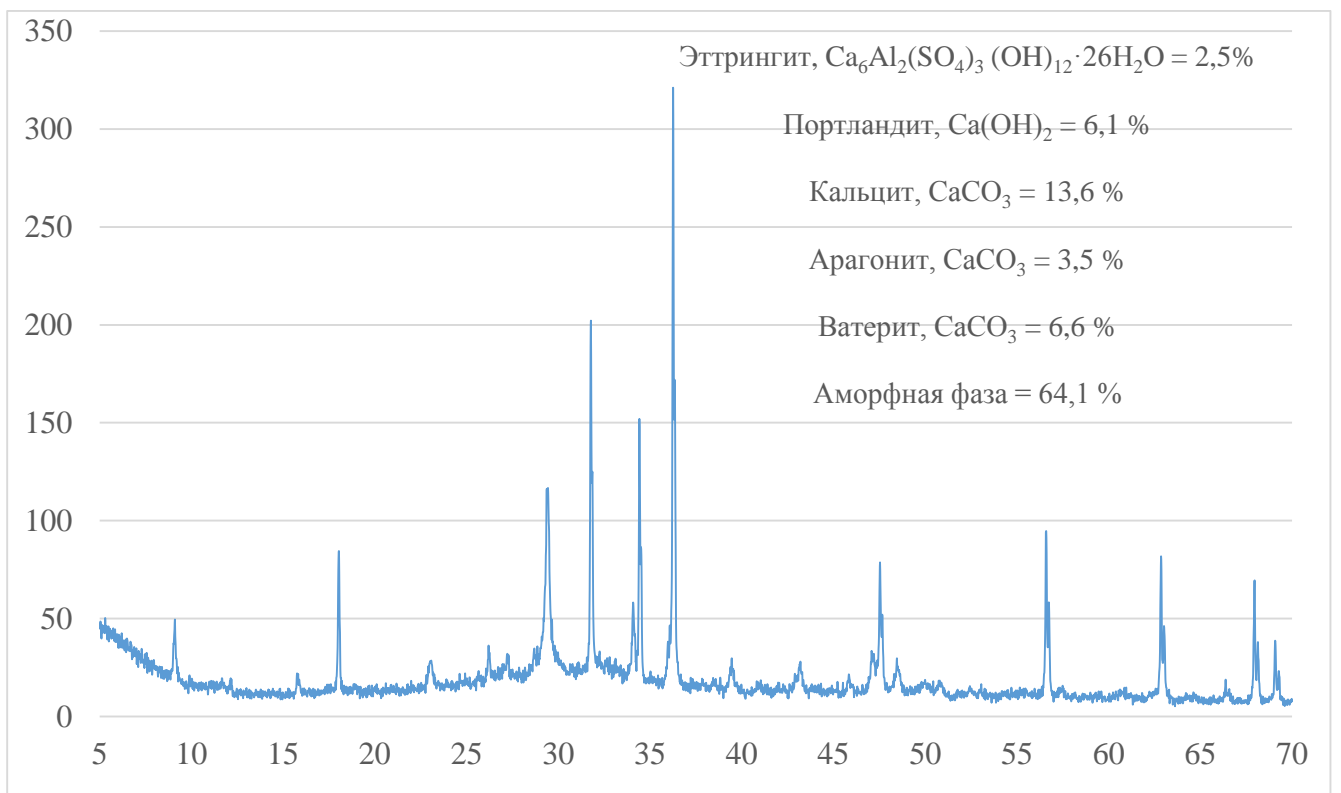


Рисунок 4.31 – Рентгеновская дифрактограмма образца с заменой 10% цемента микрокремнеземом, выдержанного в климатической камере при температуре 40° С и 100% относительной влажности в течение одного года.

Таблица 4.9 – Результаты количественного рентгено-фазового анализа образцов по методу Ритвельда, содержание минералов в процентах

Состав и условия испытания	Эттрингит, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	Портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Кальцит CaCO_3	Арагонит CaCO_3	Ватерит и CaCO_3	Аморфная фаза	R_{wp} степень сходимост и
Контрольный состав, обычные условия	2,5	6,1	13,6	–	6,6	64,1	13,41
Замена 10 % цемента микрокремнеземом, обычные условия	2,7	3,8	9,3	–	9,9	74,3	12,82
Контрольный состав, экспозиция	4,1	3,3	10,6	3,5	–	78,4	12,75
Замена 10 % цемента МК, экспозиция	3,5	3,3	6,2	1,0	5,9	80,1	12,73

Согласно полученным результатам, при выдерживании образцов при нормальных условиях, в модифицированном микрокремнеземном образце по сравнению с контрольным составом содержание аморфной фазы увеличилось на 10 %, а фазы портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) снизилось на 37 %. В свою очередь, после годовой экспозиции образцов в климатической камере содержание фазы портландита для контрольного и модифицированного микрокремнеземом состава практически не отличается. Также стоит отметить возрастание содержания эттрингита и кальцита в образцах контрольного состава после экспозиции в климатической камере.

Таким образом, в работе изучалось превентивное действие микрокремнезема как наиболее эффективной добавки для подавления ЩСР в ГПС-бетонах.

Проведенные эксперименты показывают, что микрокремнезем способствует уплотнению структуры ГПС-бетона и быстрейшему времени его схватывания на начальных этапах твердения, что ведет к раннему приросту прочности бетона. На 28-ые сутки микрокремнезем способствует приросту прочности до 25% по сравнению с контрольным составом.

Как известно, помимо щелочных соединений, поступающих в бетон из цемента и заполнителя, на развитие ЩСР в ГПС-бетонах в большой степени влияет содержание кристаллических фаз портландита на границе раздела фаз «заполнитель-цементный камень». Как уже было указано выше, после выдерживания образцов в климатической камере можно судить о состоянии ГПС-бетона к концу срока эксплуатации. Из сравнения количества фаз портландита в экспонированных и неэкспонированных в климатической камере образцах можно сделать вывод, что под действием высокой температуры и влажности протекание химических процессов ускоряется и портландит растворяется. Это способствует увеличению концентрации как необходимых для протекания реакции гидроксид ионов, взаимодействующих с кремнеземом заполнителя, так и ионов кальция, которые преобразуют щелоче-силикатный гель и делают его более сложным по химическому составу, менее подвижным, способным накапливаться в порах композита и заполнителя, приводя к образованию расширений бетона. Согласно проведенному рентгено-фазовому анализу, добавка микрокремнезема способствует структурным преобразованиям в теле бетона. Из сравнения количества портландита и аморфной фазы в составе выдержанных в нормальных условиях образцов контрольного и модифицированного микрокремнеземом составов видно, что микрокремнезем вступает в химическое взаимодействие с гидроксидом кальция и связывает его в низкоосновные гидросиликаты кальция. Как правило, портландит образуется на границе раздела фаз «заполнитель – цементный камень». Связывая портландит на начальном этапе твердения бетона, микрокремнезем способствует упрочнению и уплотнению межфазной зоны, ограждая заполнитель от доступа щелочей бетона. Более низкое содержание

этtringита и кальцита в образце модифицированного состава после экспозиции в климатической камере также говорит о более плотной структуре межфазной зоны.

Таким образом, добавки, обладающие пуццолановыми свойствами, способствуют структурным преобразованиям в ГПС-бетоне на границе раздела фаз на начальных этапах твердения композита, препятствуя доступу щелочей к заполнителю и протеканию ЩСР в ГПС-бетонах. Данные, полученные по результатам проведения рентгено-фазового анализа, коррелируют с результатами микроструктурных исследований.

На основе полученных данных была предложена схема предотвращения ЩСР в ГПС-бетоне при применении пуццолановых добавок (рисунок 4.32).

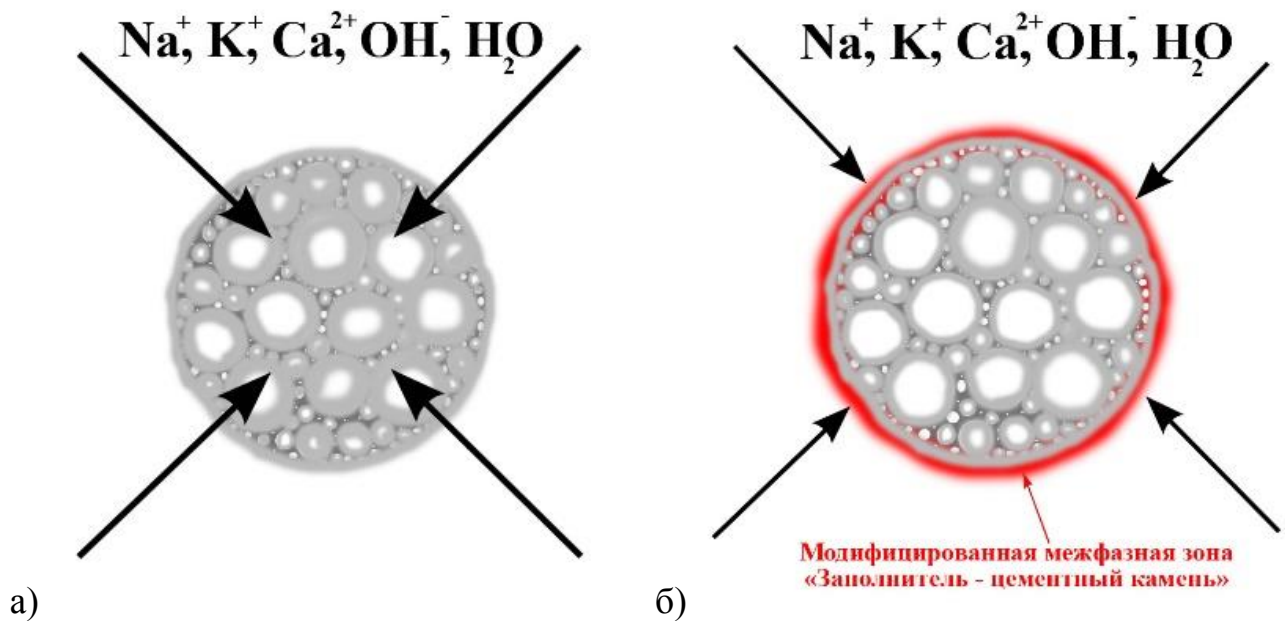


Рисунок 4.32 – Схема протекания ЩСР в ГПС-бетоне: а – контрольного состава; б – состава, модифицированного микрокремнеземом.

Модифицированная межфазная зона «заполнитель – цементный камень» ограждает заполнитель от действия щелочных и гидроксид ионов, в результате чего в процессе эксплуатации ГПС-бетона заполнитель остается более целостным, а объем образованного силикатного гидрогеля в процессе протекания реакции сокращается.

4.7 Разработка итоговых составов ГПС-бетона с учетом превентивных мер против протекания ЩСР

В результате исследований было доказано, что степень проявления коррозии зависит от условий эксплуатации бетона. Ускоренные испытания № 3 и № 4, а также выдерживание образцов при нормальных условиях симулировали «мягкие», «средние» и «жесткие» условия эксплуатации, соответственно. Под «мягкими» в работе понимается эксплуатация ГПС-бетона в благоприятных условиях, таких как внутренние стены и перегородки зданий и сооружений. Соответственно, под «средними»: эксплуатация ГПС-бетона в обычных условиях, таких как ограждающие конструкции зданий и сооружений в различных климатических зонах РФ, а под «жесткими»: 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.

В результате работы были определены рекомендуемые способы защиты легкого бетона на основе гранулированного пеностекла марки «НеоПорм» против протекания ЩСР в зависимости от температурно-влажностного режима внешней среды при эксплуатации. Так, при эксплуатации в «мягких» условиях необходимость применения превентивных мер в бетоне отсутствует. В «средних» условиях необходимо применение пуццолановых добавок высокой реакционной активности, таких как микрокремнезем. Рекомендуется, также, дополнительное использование низкощелочного цемента в качестве вяжущего. В «жестких» условиях эксплуатации помимо применения пуццолановой добавки высокой реакционной активности (микрокремнезема) необходимо дополнительное уплотнение структуры композита золами-уноса. При этом не рекомендуется использование ГПС-бетонов плотностью ниже 600 кг/м^3 . На основе проведенных

исследований разработанные составы ГПС-бетона были модифицированы превентивными мерами против протекания ЩСР (таблица 4.10). Выбор состава (необходимость применения пуццолановых добавок) производится на основе предполагаемых условий эксплуатации ГПС-бетона.

Таблица 4.10 – Составы и 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 сух. сост., Вт/м·К	Сорбционная влажность, при φ=80 %, %
D 400	180	120			100	2,2 – 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			

4.8 Заключение по главе

1. Разработаны превентивные меры, предотвращающие, либо подавляющие щелоче-силикатные реакции в системе «активный заполнитель – цементный камень», в качестве которых предложено применение: цементов с пониженным содержанием щелочных соединений, а также пуццолановых добавок различной реакционной активности. На основании проведенных испытаний на расширение бетонных балочек, а также микроструктурных и физико-механических исследований образцов после прохождения испытаний было 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 щелочных и гидроксид-ионов из внешней среды данная превентивная мера может быть малоэффективной в ГПС-бетоне, что обуславливает необходимость применения пуццолановых добавок, действие которых приводит к снижению доступа свободных щелочей к заполнителю. В работе наиболее эффективной превентивной мерой оказалось 10% замещение цемента микрокремнеземом.

2. Исследован механизм действия пуццолановых добавок на протекание ЩСР в ГПС-бетоне. В зависимости от разновидности пуццолановой добавки, ее превентивное действие связано как с общим уплотнением структуры цементного камня непрореагировавшими низкоактивными дисперсными частицами золы-уноса, так и модификацией межфазной зоны «заполнитель-цементный камень» частицам, обладающими пуццолановой способностью. добавки, обладающие пуццолановыми свойствами, способствуют структурным преобразованиям цементной матрицы на границе раздела фаз на начальных этапах твердения композита, препятствуя доступу щелочей к заполнителю и протеканию ЩСР в ГПС-бетонах.

3. Предложена схема превентирования ЩСР в ГПС-бетоне при применении пуццолановых добавок. Модифицированная межфазная зона

«заполнитель – цементный камень» ограждает заполнитель от действия щелочных и гидроксид ионов, в результате чего в процессе эксплуатации ГПС-бетона заполнитель остается более целостным, а объем образованного силикатного гидрогеля в процессе протекания реакции сокращается.

4. Определено влияние ЩСР на физико-механические и теплофизические свойства ГПС-бетонов. Основные последствия ЩСР в ГПС-бетонах заключаются в деструкции заполнителя по причине образования в его порах силикатного гидрогеля под действием щелочей цемента и щелочей из внешней среды. При этом, цементная матрица композита остается целостной, а гранулы изолированными друг от друга. Теплопроводность легкого бетона обуславливается количеством газовой фазы в порах заполнителя, объем которой незначительно изменяется в процессе протекания ЩСР в ГПС-бетоне. В то же время наблюдается снижение прочностных показателей ГПС-бетона. В зависимости от состава экспонированных образцов наблюдается снижение прочности бетона на 20–35 %.

5. Определены рекомендуемые способы защиты легкого бетона на основе гранулированного пеностекла марки «НеоПорм» против протекания ЩСР в зависимости от температурно-влажностного режима внешней среды при эксплуатации. Разработанные составы проранжированы по эффективности применения в зависимости от условий эксплуатации изделий, с учетом обеспечения сохранения физико-механических и теплотехнических характеристик ГПС-бетона. К рекомендуемым превентивным мерам 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.). Предложены составы легкого бетона с применением гранулированного пеностекла с плотностью 410–790 кг/м³, прочностью 2,2–6,5 МПа, теплопроводностью 0,09–0,15 Вт/(м·К). Установлены зависимости основных физико-механических характеристик изделий от вида ГПС и состава бетона.

5 ВНЕДРЕНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Применение ГПС в композитах на основе цемента актуально при получении теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных строительных материалов, обладающих малой теплопроводностью и относительно высокой несущей способностью. ГПС-бетон, помимо использования в монолитных элементах зданий и сооружений, может использоваться для получения строительных блоков, штукатурных смесях и кладочных растворах. Рациональная область применения ГПС-бетона - наружные стены и покрытия зданий, где требуются низкая теплопроводность и малый вес.

В связи с этим, апробация разработанного материала проводилась при производстве конструкционно-теплоизоляционных блоков, обладающих как достаточными прочностными характеристиками до 3 – 5 МПа, так и низким коэффициентом теплопроводности. Объем производства данной разновидности строительных изделий возрастает в силу увеличивающейся тенденции к строительству малоэтажного жилья среди населения.

5.1 Технология производства ГПС-бетона и изделий на его основе

В работе рассматривалась как технология получения ГПС, так и бетона на его основе. Особенности технологии получения ГПС заключается в расплавлении стеклобоя, его последующем вспучивании и быстром охлаждении. Стеклобой после сушки измельчается в шаровой мельнице до удельной поверхности порядка 3000 см²/г. Углеродосодержащий газообразователь добавляется в мельницу к стеклобою для их совместного помола и гомогенизации. Из мельницы порошок поступает в расходный бункер шихтовального отделения. Реакция выщелачивания стекла начинается при его гидролизе, поэтому для приготовления шихты

используется жидкое стекло. Механизм разрушения стекла можно представить следующим образом. Водный щелочной раствор силикатов натрия и калия проникает в дефекты стекла и разрушает его силановые связи. Гидроксид натрия реагирует с кремнеземной составляющей стекла по схеме 5.1:



В случае применения в качестве газообразователя азотной кислоты и нитратов, они добавляются в раствор вместе с водой и жидким стеклом. Перемешивание их происходит в баке - дозаторе, снабженном мешалкой. Отдозированный раствор поступает в смешивающие бегуны, где смесь перетирается. После чего шихта подается в сушильный барабан, где сушится при 80 - 200°C. Высушенная шихта размалывается в мельнице до удельной поверхности 3500 - 5000 см²/г. Полученный порошок подается на тарельчатый гранулятор. Окатанные гранулы сушатся в сушильном барабане при 80 - 100°C, затем поступают во вращающуюся печь. Одновременно в печь подается инертный порошок. Физические процессы спекания и вспенивания аналогичны таковым при получении пеноматериалов из пиропластических масс, например, при получении керамзита. Оптимальная температура вспенивания находится в интервале 800 - 900° С. Продолжительность вспенивания составляет около 15 мин. Из печи смесь вспученных гранул и порошка подается на грохот, где происходит фракционирование пеностекла (при необходимости) и отсев порошка. Порошок снова возвращается в печь. Принципиальная технологическая схема производства ГПС приведена на рисунке 5.1.

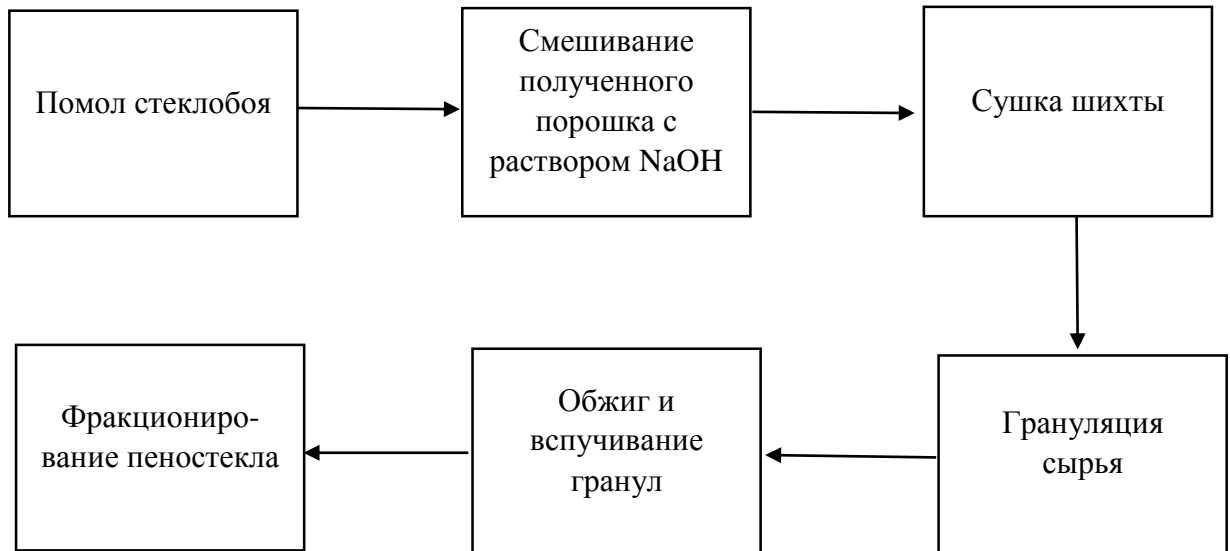


Рисунок 5.1 – Принципиальная технологическая схема производства ГПС.

Технологическая схема производства блоков из ГПС-бетона принципиально не отличается от технологической схемы получения аналогичных изделий из керамзитбетона. На первом этапе в дозаторе гранулы ГПС требуемого фракционного размера в необходимых пропорциях смешиваются в дозаторе. В зависимости от назначения бетона подбирается смесь ГПС необходимого фракционного состава. Далее смесь поступает в смеситель основных материалов, в который также поступает цемент, необходимые добавки и вода. После перемешивания смеси бетона до гомогенной массы бетон поступает на станок для изготовления строительных блоков, где изделия формируются вибропрессованием. Пустотность изделий обеспечивается введением специальных пуассонов требуемой формы. С помощью вибраций происходит плотное распределение и утрамбовка бетона в форме, излишки бетона удаляются. На заключительном этапе отформованные изделия отправляются в сушку, которая происходит в течение 7 – 10 дней на открытом воздухе. Готовые блоки укладываются на поддоны и транспортируются. На рисунке 5.2 приведена принципиальная технологическая схема производства ГПС-бетона.

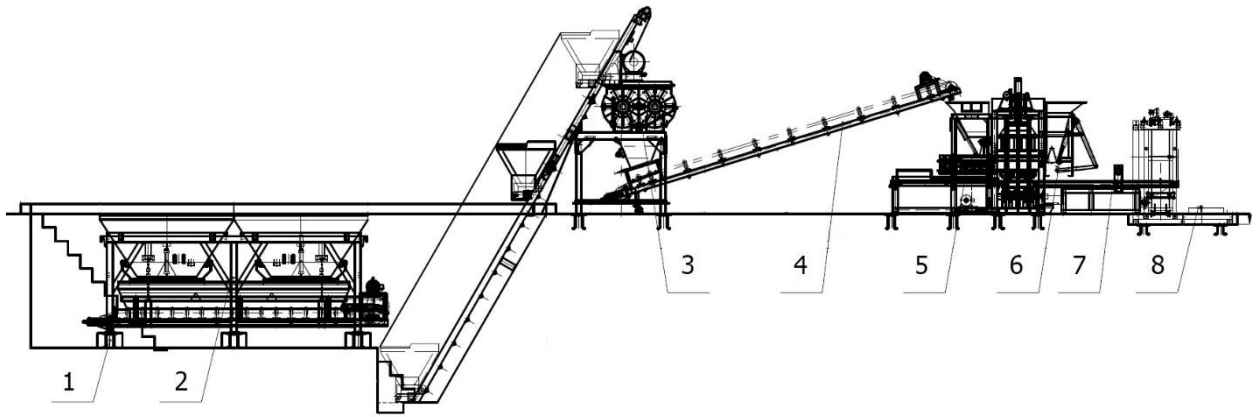


Рисунок 5.2 – Принципиальная технологическая схема производства ГПС-бетона. 1. Фундамент 2. Дозатор 3. Смеситель основных материалов 4. Конвейер основных материалов 5. Станок для изготовления строительных блоков 6. Распалубочный механизм 7. Стол для установки блоков 8. Автоукладчик

5.2 Экономическая эффективность применения ГПС для получения легких бетонов

Экономическая эффективность внедрения результатов исследований оценивалась путем сравнения материальных затрат на 1 м^3 блоков из разработанного легкого бетона с аналогичными по физико-механическим и теплотехническим показателям изделиями из газобетона. В работе оценивалась стоимость 1 м^3 готового ГПС-бетона в ценах января 2015 года. Расчет стоимости 1 м^3 ГПС представлен в таблицах 5.1 и 5.2, соответственно.

Таблица 5.1 – Расчет сырья для производства 1 тонны ГПС

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена за ед., руб.	Цена, руб.
Несортовой стеклобой	т	1	4500	4500
Помол материала до требуемой тонины порошка стекла дисперсностью менее 80—100 мкм	т	1	700	700
Жидкое стекло (силикатный модуль 2—3; плотность 1380—1440 кг/м ³)	т	0,12	14000	1680
Углеродсодержащий газообразователь глицерин	кг	5	60	300
Вода	л			
Итого:				7180

Таблица 5.2 – Расчет стоимости 1 м³ смеси ГПС

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена за ед., руб.	Цена, руб.
Сырье	т	0,2	7140	1428
Энергопотребление для термообработки 1 м ³ насыпного пеностекла при коэфф. полез. действия около 80%	кВт-ч	100	5	500
Трудозатраты и налоги	руб			400
Себестоимость ГПС				2328
Стоимость ГПС при маржинальности 30%				3026

В таблице 5.3 приведен расчет стоимости 1 м³ ГПС-бетона плотностью 700 кг/м³. В таблице 5.4 представлены стоимостные показатели ГПС-бетона различной плотности в зависимости от состава. Стоимость ГПС-бетона, включая трудозатраты, амортизация и налоги, в зависимости от состава варьируется от 2605 – 4335 руб.

Таблица 5.3 – Расчет стоимости 1 м³ ГПС-бетонных блоков

Наименование	Ед. изм	Кол-во	Цена за ед., руб	Цена, руб
ГПС при уплотнении 10%	м ³	1	2328	2328
Цемент	кг	300	5,5	1650
Микрокремнезем	кг	30	5	150
Вода				
Трудозатраты, амортизация и налоги				200
Себестоимость ГПС-бетона				4328
Стоимость ГПС при маржинальности 30%				5626,4

Таблица 5.4 – Стоимость показатели ГПС-бетона в зависимости от состава

Класс бетона по плотности	Состав, кг/м ³					Стоимость бетона, руб/м ³	
	ГПС	Цемент	Зола - унос	Микрокремнезем	Вода	На обычных цементах	На низкощелочных цементах
D 400	180	120			100	2750	2990
	170	110	20		100	2605	2825
	180	100		10	110	2750	2950
	170	100	10	10	110	2640	2840
D 500	170	200			130	2955	3355
	160	130	80		130	2600	2860
	170	180		10	140	2955	3315
	160	120	70	10	140	2635	2875
D 600	160	280			160	3160	3720
	150	180	120		150	2705	3065
	160	240		20	180	3160	3640
	150	170	100	10	170	2735	3075
D 700	140	360			200	3250	3970
	150	230	130		190	2910	3370
	150	300		30	220	3365	3965
	150	210	120	20	200	2985	3405
D 800	130	440			230	3455	4335
	150	290	140		220	3155	3735
	140	360		40	260	3570	4290
	140	250	140	30	240	3120	3620

Изменение материальных затрат на 1 м³ бетонной смеси при ГПС-бетонах в зависимости от состава составляет:

для бетона класса по плотности D 400:

$$3105,00 - 2750,00 = 355,00 \text{ руб.}; \frac{3105,00 - 2750,00}{3105,00} \cdot 100 = 11,43 \%$$

для бетона класса по плотности D 500:

$$3245,00 - 2955,00 = 290,00 \text{ руб.}; \frac{3245,00 - 2955,00}{3245,00} \cdot 100 = 8,94 \%$$

для бетона класса по плотности D 600:

$$3470,00 - 3160,00 = 310,00 \text{ руб.}; \frac{3470,00 - 3160,00}{3470,00} \cdot 100 = 8,93 \%$$

для бетона класса по плотности D 700:

$$3645,00 - 3365,00 = 280,00 \text{ руб.}; \frac{3645,00 - 3365,00}{3645,00} \cdot 100 = 7,68 \%$$

для бетона класса по плотности D 800:

$$3800,00 - 3570,00 = 230,00 \text{ руб.}; \frac{3645,00 - 3365,00}{3645,00} \cdot 100 = 6,05 \%$$

Таким образом, при использовании ГПС-бетона различного состава снижение материальных затрат составляет 6,05 – 11,43 %. Экономическая эффективность разработанного бетона по сравнению с газобетоном 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 тепло-техническим свойствам материала.

5.3 Внедрение результатов исследований в промышленных условиях и учебном процессе

Работа выполнена при финансовой поддержке: Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках конкурса на получение стипендий Президента Российской Федерации для обучения за рубежом студентов и аспирантов российских вузов в 2013/2014 учебном году (приказ №585); ФГБУ «Фонда содействию развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», договор 656ГУ1 (2013 – 2015 гг.).

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 по направлению 270800 «Строительство» профиля «Промышленное и гражданское строительство» и «Городское строительство и хозяйство», магистров по направлению 270800 «Строительство».

В результате исследований были разработаны методические рекомендации по определению потенциальной реакционной способности пористых заполнителей к протеканию ЩСР. Разработанные рекомендации основывались на методах исследований, описанных в ГОСТ 8269.0-97 и были адаптированы под морфоструктурные особенности заполнителей, имеющих высокопористую структуру.

Наличие потенциально реакционноспособного аморфного кремнезема в заполнителе определяется согласно рентгено-фазовому и химическому исследованиям заполнителя (испытание № 1). Далее концентрация потенциально

реакционноспособного аморфного кремнезема проверяется согласно испытанию на определение изменения концентрации ионов кремния в щелочном растворе после выдерживания в нем гранул заполнителя (испытание №2). При неудовлетворительных результатах испытаний №1 и №2 образцы подвергаются испытаниям на расширение бетонных балочек. Вид испытания подбирается из предполагаемых условий эксплуатации бетона. Так, «мягкие» условия симулируются выдерживанием образцов в течение одного года при температуре 20 °С и относительной влажности 65 %; «средние» условия - экспозицией образцов в течение одного года при температуре 40 °С и относительной влажности 100 %. «Жесткие» условиях симулируются при выдерживании образцов в течение 14 суток при температуре 80 °С в 1М растворе NaOH (таблица 5.5).

На основе проведенных исследований выяснено, что относительные удлинения образцов не является определяющим фактором при испытании бетона с пористыми заполнителями, поэтому после прохождения испытания исследуется несколько параметров образцов бетона: относительные удлинения балочек, а также их микроструктура и прочностные характеристики. Заполнитель считается пригодным для использования в легком бетоне при данных условиях эксплуатации, если удовлетворяется ряд требований: относительные расширения образцов не превышают допустимых значений (0,04% для годового испытания, 0,1% для 14 суточного испытания); критические деструкции структуры композита отсутствуют; заполнение пор силикатным гидрогелем по объему составляет не более 50%; наблюдаемое снижение прочности по сравнению с неэкспонированными образцами составляет менее 30%.

Таблица 5.5 - Методика оценки проявления ЩСР в легких бетонах на пористых потенциально реакционноспособных заполнителях

Условия эксплуатации бетона		
«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.
Условия проведения испытания		
Выдерживание образцов в течение одного года при темп. 20 ± 2 °С и отн. вл. 65 %	Выдерживание образцов в течение одного года при темп. 40 °С и отн. вл. 100 %	Выдерживание образцов в течение 14 сут. при темп. 80 °С в 1М растворе NaOH
Условия успешного прохождения испытания		
Отн. расширения образцов не превышают допустимых значений (0,04% для годового испытания, 0,1% для 14 суточного испытания); отсутствие критических деструкций структуры композита; заполнение пор силикатным гидrogелем по объему не более 50%; наблюдаемое снижение прочности по сравнению с неэкспонированными образцами менее 30%.		

5.4 Заключение по главе

1. Предложена технология производства изделий из ГПС-бетона с использованием вибролитьевого формования. Основными отличиями технологии

производства изделий из ГПС-бетона является использование смеси ГПС специально подобранной фракции, а также введение превентивных мер против протекания ЩСР.

2. Определена экономическая эффективность разработанного бетона по сравнению с газобетоном (до 6,05 – 11,43 % по стоимости), которая 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.

3. Разработаны методические рекомендации по определению потенциальной реакционной способности пористых заполнителей к протеканию ЩСР. Разработанные рекомендации основывались на методах исследований, описанных в ГОСТ 8269.0-97 и были адаптированы под морфоструктурные особенности заполнителей, имеющих высокопористую структуру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 деструктивных процессов в теле реакционноспособного пористого заполнителя является применение превентивных мер, способствующих снижению доступа щелочей из цементной матрицы и внешней среды к заполнителю. Эффективность превентивных мер подтверждена натурными испытаниями образцов ГПС-бетона.

2. Предложена методика оценки степени проявления щелоче-силикатных взаимодействий в легких бетонах при использовании реакционноспособных пористых заполнителей, заключающаяся в адаптации существующего метода ГОСТ 8269.0-97 и отличающаяся: применением отличных от стандартной методики химико-минералогических исследований, отличного фракционного состава заполнителя, в том числе при изготовлении испытуемых образцов; применением микроструктурных и физико-механических исследований образцов после испытания. К условиям прохождения испытания относятся: относительные расширения образцов не более 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%.

3. Разработаны превентивные меры, предотвращающие, либо подавляющие щелоче-силикатные реакции в системе «активный заполнитель – цементный камень», в качестве которых предложено применение: цементов с пониженным содержанием щелочных соединений, а также пуццолановых добавок различной

реакционной активности. Превентивные меры способствуют: снижению относительных расширений до 65%, улучшению структурной целостности композита, увеличению прочности до 30%, сокращению образования гидрогелей (по масс.) до 5%, модифицированных образцов по сравнению с контрольными составами.

4. Предложен механизм взаимодействия реакционноспособного пористого заполнителя со щелочами бетона, отличный от механизма протекания щелоче-силикатных взаимодействий в тяжелых и мелкозернистых бетонах и заключающийся в структурных преобразованиях кремнезема поверхностного слоя заполнителя в низкоосновные гидросиликаты кальция с образованием усадочных трещин стенок гранул по объему и накоплении солей кремниевой кислоты внутри пор заполнителя без образования продуктов реакции на границе раздела фаз «заполнитель – цементный камень». Таким образом, щелоче-силикатные реакции в бетоне на основе гранулированного пеностекла не приводят к появлению внутренних осмотических давлений, а способствуют лишь его частичной деструкции в объеме заполнителя.

5. Определены рекомендуемые способы защиты легкого бетона на основе гранулированного пеностекла марки «НеоПорм» против протекания ЦСР в зависимости от температурно-влажностного режима внешней среды при эксплуатации. Разработанные составы проранжированы по эффективности применения в зависимости от условий эксплуатации изделий, с учетом обеспечения сохранения физико-механических и теплотехнических характеристик ГПС-бетона. К рекомендуемым превентивным мерам относятся: применение цементов с содержанием щелочей (по Na_2Oe) не более 0,6%, добавка зол-уноса (до 30% по масс. цем.), замена цемента микрокремнеземом (до 10% по масс. цем.).

6. Предложены составы легкого бетона с применением гранулированного пеностекла с плотностью 410–790 кг/м³, прочностью 2,2–6,5 МПа, теплопроводностью 0,09–0,15 Вт/(м·К). Установлены зависимости основных физико-механических характеристик изделий от вида ГПС и состава бетона.

Модернизирована технологическая схема производства изделий из ГПС-бетона с использованием превентивных мер.

7. Экономическая эффективность разработанного бетона по сравнению с газобетоном (до 8-10% 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глущенко, Л. Ф. Теплотехника в строительстве и строительном производстве: Учеб. пособие / Л. Ф. Глущенко, А. С. Маторин, Н. Ф. Лисицкий; под общ. ред. Л.Ф. Глущенко // К.: Высшая школа, 1991.- 295 с;
2. СНиП II-3-79** Строительная теплотехника / Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 1998.- 29с;
3. Овчаренко, Е. Г. Основные направления развития производства эффективных теплоизоляционных материалов / Е. Г. Овчаренко, В. Г. Петров-Денисов, В. М. Артемьев // Строительные материалы. 1996. - № 6. - С. 2 - 4.
4. Рекитара, Я. А. Экономическая эффективность производства и применения стеновых материалов и конструкций. / Я. А. Рекитара // М.: Стройиздат, 1972.-208с.
5. Комохов, П. Г. Структурная механика и теплофизика легкого бетона / П. Г. Комохов, В. С. Грызлов// Вологда: Вологод. науч. цент, 1992. - 320 с.
6. Семенова, Е. И. О некоторых требованиях к микроклимату жилища / Е. И. Семенова, Э. С. Ефремова, Н. С. Смирницкий // Теплотехнические качества и микроклимат крупнопанельных жилых зданий. сб. № 3. - ЦНИИЭП жилища. - М.: Стройиздат, 1974. - 35 - 52.
7. Семченков, А. С. Энергосберегающие ограждающие конструкции зданий // Бетон и железобетон. 1996. №2. С. 6-9.
8. Баженов, Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов. -М.: Стройиздат, 1975.-182 с.
9. Баженов, Ю. М. Технология бетона. М.: Высшая школа, 1987. — 415 с.
10. Горчаков, И. Г. Строительные материалы / И. Г. Горчаков, Ю. М. Баженов //М.: Стройиздат, 1986.-688 с.

11. Комар, А. Г. Строительные материалы. М.: Высшая школа, 1971.-540с.
12. Бужевич, Г. А. Исследования по крупнопористому бетону на пористых заполнителях. НИИЖБ.: М., Госстройиздат, 1962. - 132с.
13. Бужевич, Г. А. Легкие бетоны на пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1970.-272 с.
14. Опекунов, В. В. Конструкционно- теплоизоляционные бетоны. К.: Академперіодика. - 2002. — 270 с.
15. Скрамтаев, Б. Г., Элинзон М.П. Легкие бетоны / Б. Г. Скрамтаев, М. П. Элинзон // М.: Промстройиздат, 1956 г.
16. Бурлаков, Г.С. Технология изделий из легкого бетона. — М.: Высш. школа, 1986.-296с.
17. ТУ 5830 001 - 03894386 - 01. Блоки стеновые мелкие из пенобетона неавтоклавного твердения. Технические условия.
18. Блещик, Н. П. Технология производства изделий из крупнопористого легкого бетона / Н. П. Блещик, М. Г. Лазарашвили // Строительные материалы. 2004. - № 11.-С. 35-37.
19. Вейнер, Т. М. Производство стеновых блоков // Строительные материалы. -1993.- № 5 С.29- 30.
20. Завадский, В. Ф. Производство стеновых материалов и изделий: Уч. Пособ / В. Ф. Завадский, А. Ф. Косач // Новосибирск: НГАСУ, 2000. - 168с.
21. Горяйнов, К. Э. Технология теплоизоляционных материалов и изделий / К. Э. Горяйнов, С. К. Горяйнова // М.: Стройиздат, 1982. — 376 с.
22. Симонов, М. З. Основы технологии легких бетонов. М.: Стройиздат, 1973.- 684 с.
23. Рыбьев, И. А. Строительное материаловедение. М.: Высш. шк., 2002. - 701с.

24. Симонов, М. З. Основы технологии легких бетонов. М.: Стройиздат, 1973.-584 с.
25. Баженов, Ю. М. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона / Ю. М. Баженов, В. А. Вознесенский // М.: Стройиздат, 1974.- 192 с.
26. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Статистика, 1974. — 192 с.
27. Горбунов, С. П. Применение ЭВМ в решении рецептурно-технологических задач: учебное пособие для самостоятельной работы студентов / Изд-во ЮУрГУ, 2007, 70 с.
28. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона, НИИЖБ. М., 1982. -103с.
29. ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия.
30. ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности на сжатие и растяжение. Технические условия.
31. ГОСТ 12730.(0-5)-94 Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости.
32. ГОСТ 5742-81 Изделия из ячеистых бетонов теплоизоляционные. Технические условия.
33. ГОСТ 9758 86 Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний.
34. Горчаков, Г. И. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г. И. Горчаков, Л. П. Орендлихер, В. И. Савин // -М.: Стройиздат, 1976. 145с.

35. Ларионова, З. М. Формирование структуры цементного камня и бетона.— М.,1971.-161 с.
36. Хрулев, В. М. Состав и структура композиционных материалов. Учеб. Пособие для строит.-технологич. специальн. вузов./ В. М. Хрулев, Ж. Т. Тентиев, Курдюмова В.М. // Бишкек: Изд. «Полигон», 1997. — 120 с.
37. Федосов, С. В. Нестационарный тепло- и массоперенос в многослойных ограждающих конструкциях / С. В. Федосов, А. М. // Строительные материалы. — 2006. № 4. - С. 86 - 87.
38. Ли, Ф. М. Химия цемента и бетона / пер. с англ. Б. С. Левмана; Под ред. С. М. Рояка.- М.: Госстройиздат, 1961. 645с.
39. Шейкин, А. Е. Структура и свойства цементных бетонов/ А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер // М.: Стройиздат, 1979. 344с.
40. Карпикова, Л. И. Зависимость плотности легкого бетона от некоторых технологических факторов // Сб. науч. тр.: Новое в технологии легких бетонов на пористых заполнителях /НИИЖБ. М., 1975, вып. 25.- 89с.
41. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981.-463с.
42. Сизов, В. П. О влиянии заполнителей на расход цемента и прочность бетона // Бетон и железобетон.- 1998.- № 3. С. 5-6.
43. Формская, О. П. Некоторые пути улучшения свойств легких бетонов. — В кн.: Строительные материалы. Д., 1961, с. 21-23.
44. Виноградов, Б. Н. Влияние заполнителей на свойства бетонов.— М.: Строй-издат, 1979. 222 с.
45. Yu, Q. L. Development of cement-based lightweight composites – Part 1: Mix design methodology and hardened properties/ Q. L. Yu, P. Spiesz, H. J. H. Brouwers // Cement and Concrete Composites, V. 44, 2013, p. 17–29.

46. Ke, Y. Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete/ Y. Ke, A.L. Beaucour, S. Ortola, H. Dumontet, R. Cabrillac // *Constr Build Mater* 2009;23:2821–8.
47. Lo, T. Y., The effects of aggregate properties on lightweight concrete / T. Y. Lo, W. C. Tang, H. Z. Cui // *Build Environ* 2007;42:3025–9.
48. Zhang, M. H. Microstructure and properties of high strength lightweight concrete. Trondheim (Norway): Norwegian Institute of Technology. Division of Building Materials; 1989.
49. Short, A. Lightweight concrete / Short A., Kinniburgh W. // 3rd ed. London: Applied Science Publishers; 1978.
50. Ларионова, З. М. Влияние вида заполнителя на структурообразование контактной зоны бетонов // Структурообразование бетона и физико — химические методы его исследования. М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1980.-с. 69-76.
51. Рыбьев, И. А. Влияние пористости в зоне контакта на прочность бетона при изгибе/ И. А. Рыбьев, Ю. В. Чеховский, И. К. Касимов // *Бетон и железобетон.* - 1979.-№3.- С.10-12.
52. Ярлушкина, С. Х. Физико химические процессы и их роль в формировании прочности контакта цементного камня с заполнителем // Структурообразование бетона и физико — химические методы его исследования. - М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1980. - с. 60-69.
53. Wasserman, R. Interfacial interaction in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength / R. Wasserman, A. Bentur // *Cem Concr Compos* 1996;14(4):239–48.
54. Alexander, K. M. Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete / K. M. Alexander, J. Wardlaw, D. J. Gilbert // *Proceeding of an International Conference in the Structure of Concrete*, Cement and Concrete Association, London, 1968, p. 59.

55. Zhang, M. H. Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste / M. H. Zhang, O. E. Gjorv // *Cem. Concr. Res.* 20 (4) (1990) 610– 618.
56. Struble, L. A Review of the cement-aggregate bond / L. Struble, J. Skalny, S. Mindess // *Cem. Concr. Res.* 10 (1980) 277. R.A. Zimbelmann, Contribution to the problem of cement-aggregate bond, *Cem. Concr. Res.* 15 (1985) 801.
57. Bentz, D. P. Experimental and simulation studies of the interfacial zone in concrete / D. P. Bentz, P. E. Stutzman, E. J. Garboczi // *Cem. Concr. Res.* 26 (1996) 35.
58. Lo, T. Y. Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete/ T. Y. Lo, H. Z. Cui // *Materials Letters*, V.58,Is.6, 2004, p.916-919.
59. Zimbelmann, R. A. contribution to the problem of cement-aggregate bond. *Cement and Concrete Research* 1985;15:801–8.
60. Diamond, S. Cement paste microstructure in concrete / L. J. Struble, P. W. Brown // *Microstructural Development During Hydration of Cement*, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 85, 1987, pp. 21– 23.
61. Loudon, A. G. The thermal properties of lightweight concretes. *Int J Lightweight Concrete* 1979;11(2):71–85.
62. Demirboga, R. Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures / R. Demirboga, R. Gul// *Energy Build* 2003;35:1155–9.
63. Choi, Y.W. An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete / Y. W. Choi, Y. J. Kim, H. C. Shin, H. Y. Moon // *Cem. Concr Res* 2006; 36:1595–602.
64. Bentz, D. P. Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars. *Cem Concr Compos* 2009;31(5):285–9.

65. Баринаова, Л. С. Тенденции развития промышленности строительных материалов за рубежом //Строительные материалы. 2004. -№ 11 .-С. 2-6.
66. Инструкция по изготовлению конструкций и изделий из бетонов, приготавливаемых на пористых заполнителях: СН 483-76: М., 1977, 58с.
67. Иванов, И. А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях. — М.: Стройиздат, 1993.- 182с.
68. Попов, Н. А. Основные свойства искусственных пористых заполнителей и легких бетонов на пористых заполнителях и их применение в строительстве / Н. А. Попов, М. П. Элинзон, Я. Ш. Штейн //М.:Изд-во лит. по стр-ву, 1966. -С. 17-25.
69. Бруссер, М. И. Заполнители для бетона: современные требования к качеству // Строит, матер. 2004. - № 10. - С. 62 - 63.
70. Вальц, К. Конструктивный высокопрочный легкий бетон / К. Вальц, Г. Вишерс // М.: Стройиздат, 1969. 79 с.
71. Жуков, А. В. Пористые материалы и заполнители для легких бетонов / А. В. Жуков, Е. М. Коленов, Т. Т. Труцко // Киев, 1958.
72. Иванов, И. А. Технология легких бетонов на искусственных пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1974. - 287 с.
73. Давидюк, А. Н. Конструкционно-теплоизоляционные легкие бетоны на стекловидных пористых заполнителях (диссертация). Ростов-на-Дону: НИИЖБ, ФГУП "КТБ ЖБ", РГСУ. 2009. — 387 с.
74. Калниньш, Г.А. Керамзитобетон для несущих конструкций зданий/ Г. А. Калниньш, И. А. Калис //Рига, 1976. 166 с.
75. Мешкаускас, Ю. П., Керамзитобетон / Ю. П. Мешкаускас, В. И. Баркаускас и др. // Вильнюс. 1968., 156с.
76. Ваганов, А. И. Керамзитобетон. Л - М.: Стройиздат, 1954. - 72 с.

77. Горин, В. М. Керамзит: опыт и перспективы развития производства и применения / В. М. Горин, С. А. Токарева, М. К. Кабанова // Строительные материалы. 2004. - № 11.-С. 32-34.
78. ГОСТ 9759. Гравий и песок керамзитовые. Технические условия. М.: Изд-во стандартов. - 12 с.
79. Довжик, В. Г. Технология высокопрочного керамзитобетона / В. Г. Довжик, В. А. Дорф// М.: Стройиздат, 1976 г. 136 с.
80. Полинковская, А. И. Вспученный перлит -заполнитель легких бетонов / А. И. Полинковская, Н. И. Сергеев, О. А. Чернова // М., 1971.
81. Беров, Я. И. Некоторые аспекты использования перлитобетона в строительстве / Я. И. Беров, С. И. Петров, П. Г. Дудко, В. В. Наседкин // Строительные материалы. — 2006.-№ 6.-С. 82-83.
82. Овчаренко, Е. Г. Перспективы производства и применения вспученного перлита // Строительные материалы. 1999. - № 2. - С. 14-15.
83. Гусев, Б. В. Строительная экология / Б. В. Гусев, Ю. Г. Трофименков, Е. А. Гусев, А. И. Радкевич //Строительные материалы 1997.- С. 12-14.
84. Павлушкин, Н. М.Стекло. Справочник / Под ред. Н.М. Павлушкина // М., Стройиздат, 1973, 487 с.
85. Лопатчиков, М. И. Сырьевая база производства нерудных строительных материалов Российской Федерации // Строительные материалы. 2006. № 8. С. 42-44.
86. Пузанов, С. И. Оценка комплексного воздействия стеклобоя на окружающую среду и совершенствование технологий его вторичного использования [Текст]*: автореф. дис., к.т.н. 03.00.16 / С.И. Пузанов. – Пермь 2010. – 18 с.

87. Фахратов, М. А. Эффективная технология использования промышленных отходов в производстве бетона и железобетона // Строит, материалы. 2003. № 12. С. 48-49;

88. Hurley, J. A. UK Market survey for foam glass. Glass: research and development final report, The Waste and Resources Action Programme, WRAP Report; March 2003.

89. Демидович, Б. К. Пеностекло. Минск: Наука и техника, 1975. — 245 с.

90. Китайгородский, И. И. Пеностекло / И. И. Китайгородский, Т. Н. Кешишян // Промстройиздат, 1953.-320 с.

91. ТУ 5914-001-00643867-94 Гранулированное пеностекло.

92. Шилл, Ф. Пеностекло: Производство и применение / Пер. с чешского Г. М. Матвеева. -М.: Стройиздат, 1965. 308с.

93. Кетов, А. А. Опыт производства пеностеклянных материалов из стеклобоя / А. А. Кетов, И. С. Пузанов, Д. В. Саулин // Строительные материалы. — 2007. № 3. — С. 70 - 72.

94. Кулаева, Н. С. Пеностекло из стеклобоя / Н. С. Кулаева, М. С. Гаркави // Строительные материалы. 2007. - № 3. - С. 74.

95. Погребинский, Г. М. Гранулированное пеностекло как перспективный теплоизоляционный материал / Г. М. Погребинский, Г. И. Искоренко // Строительные материалы. -2003.-№3.-С. 28-29.

96. Арутюнян, М. Р. Легкие бетоны на основе пеностеклогранулята с насыпной плотностью 200-350 кг/м³ и их основные физико-механические и теплофизические свойства: Автореф. дисс. канд. тех. наук-М.: 1990 г.

97. Давидюк, А. Н. Теплотехнические характеристики новых видов легких бетонов на стекловидных заполнителях / А. Н. Давидюк, И. Н. Сурикова, В. Г.

Гагарин // Применение, перспективы развития легких бетонов в строительстве. Ашхабад.: 1987.-С. 151 - 152.

98. Жудов, В. Ф. Легкие бетоны из гранулированного пеностекла для ограждающих конструкций / В. Ф. Жудов, В. Д. Лихачев, В. В. Попов// М.: Стройиздат, 1985. — С. 41.

99. Путляев, И. Е. Легкие бетоны на пеностеклогрануляте / И. Е. Путляев, А. Н. Давидюк, М. Р. Арутюнян, Э. Р. Саакян// Бетон и железобетон. — 1990. № 11. — С. 14 — 15.

100. Петросян, П. А. Разработка конструкционных пеностеклогранулятобетонов / П. А. Петросян, Э. Р. Саакян, А. Л. Восканян, Р. Л. Восканян // Технологии бетонов. -2006.-№ 2.-С. 12-14.

101. Яворский, А. К. Эффективный легкий бетон на гранулированном пеностекле. / Развитие производства и применения легких бетонов и конструкций из них, в том числе с использованием промышленных отходов. М.: Стройиздат, 1981.- С. 40-41.

102. Розенталь, Н. К. Коррозия бетона при взаимодействии щелочей с диоксидом кремния заполнителя / А. Н. Розенталь, Г. В. Любарская // Ладыя: Бетон и железобетон, №1(6), 2012, с. 50-60.

103. Розенталь, Н. К. Защита бетона на реакционноспособном заполнителе от внутренней коррозии / Н. К. Розенталь, Г. В. Чехний, Г. В. Любарская, А. Н. Розенталь // Строительные материалы, № 3, 2009, С. 68-71.

104. Москвин, В. М. Коррозия бетона при действии щелочей цемента на кремнезём заполнителя / В. М. Москвин, Г. С. Рояк // М.: Госстройиздат, 1962.-164 с.

105. Москвин, В. М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеев // М.:Стройиздат.-1980.-536с.(с. 274-285).

106. Брыков, А. С. Щелочно-силикатные реакции и коррозия бетона // Журнал Цемент и его применение, изд-во Журнал "Цемент", 2009 г. №5, с. 31-37.
107. Брыков, А. С. Щелоче-силикатные реакции и коррозия бетона [Текст]: учебное пособие / А.С. Брыков. – СПб.:СПбГТИ(ТУ), 2009. – 27 с.;
108. Иванов, Ф. М. Коррозионные процессы и стойкость бетона в агрессивных средах. Автореф. дисс. . д.т.н. М., 1969. - 30 с.
109. Морозова, Н. Н. Проблема щелочной коррозии бетонов в Республике Татарстан и пути её решения / Н. Н. Морозова, В. Г. Хозин, А. И. Матеюнас, Н. А. Захарова, Э. П. Акимова // Известия КГАСУ, 2005, № 2, С. 58-63.
110. Бабушкин, В. И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / под ред. В. Б. Ратинова М.: Стройиздат, 1968.-237с.
111. Zatler, B. Alkali–aggregate reaction in lightweight concrete, in: G.M. Idorn, S. Rostam (Eds.) / B. Zatler, E. Mali // 6th International Conference—Alkalis in Concrete Research and Practice Proceedings, Danish Concrete Association, Copenhagen, 1983, pp. 495– 502.
112. Ceukelaire, L. De. Alkali– silica reaction in a lightweight concrete bridge, Proc. of the 9th International Conference on Alkali–Aggregate Reaction in Concrete, The Concrete Society, London, 1992, pp. 231–239.
113. Crumpton, C. F. Lightweight aggregate concrete sometimes grows. Blame ASR if it is the most likely cause, *Concr. Constr.* 33 (6) (1988) 618– 619; (12) (1988) 1103–1105.
114. Collins, R. J. Alkali–silica reaction: Suppression of expansion using porous aggregate / R. J. Collins, P. D. Bareham // *Cem. Concr. Res.* 17 (1) (1987) 89–96.
115. Collins, R. J. Alkali aggregate reactivity in dense concretes containing synthetic or porous natural aggregate / *Cement and Concrete Research*. Vol. 19, 1989, pp. 278-288.

116. Lindgård, J. Alkali aggregate reactions in LWAC—introductory laboratory testing / J. Lindgård, H. Justnes, M. Haugen, P. A. Dahl // SINTEF report SBF52 F06004, Trondheim, Norway, 2006.

117. RILEM TC 106-AAR, 'Alkali aggregate reaction' A. TC 106-2—Detection of potential alkali-reactivity of aggregates—the ultra-accelerated mortar-bar test B. TC 106-3—Detection of potential alkali-reactivity of aggregates—method for aggregate combinations using concrete prisms, *Mater. Struct.* 33 (2000) 283–293.

118. ASTM C1293—08b Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali–Silica Reaction, American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, 2008, p. 7.

119. Rivard, P. Assessing alkali–silica reaction damage with nondestructive methods: from the lab to the field / P. Rivard, F. Saint-Pierre // *Constr Build Mater* 2009;23(2):902–9.

120. Akashi, T. The estimate for deterioration due to alkali aggregate reaction by ultrasonic methods / T. Akashi, S. Amasaki, N. Takagi // In: 7th International conference on AAR. Canada, Ottawa; 1986. p. 10–7.

121. Wu, H. C. Nonlinear acoustic non-destructive testing for concrete durability / H. C. Wu, K. Warnemuende // *Non-destruct Eval Highways* 2000;39:501–7.

122. Corinaldesi, V. Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars / V. Corinaldesi, G. Gnappi, G. Moriconi, A. Montenero // *Waste Manag* 2005;25(2):197–201.

123. Shao, Y. Studies on concrete containing ground waste glass / Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez // *Cem Concr Res* 2000;30(1):91–100.

124. Dolar-Mantuani, L. Handbook of Concrete Aggregates, Noyes Publications, New Jersey, 1983, pp. 80–113.

125. Белоусов, Ю. Л. Устойчивость пеностекла на контакте с цементным раствором / Ю. Л. Белоусов, С. В. Алексеев // Строительные материалы. 1999. - № 7—8 — С. 45-47.
126. Иванова, С. М. Композиционный цементный пеностеклобетон [Текст]*: дис., к.т.н. 05.23.05 / С. М. Иванова // Челябинск 2005. – 273 с.
127. Mladenović, A. Alkali-silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates / A. Mladenović, J. S. Šuput, V. Ducman, A. S. Škapin // Cement and Concrete Research 34, 2014, 1809-1816.
128. Ducman, V. Lightweight aggregate based on waste glass and it's alkali-silica reactivity / V. Ducman, A. Mladenovic, J. S. Suput // Cem. And Concr. Research 32 (2002), 223-226.
129. Bumanisa, G. Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete /. Bumanisa, D. Bajarea, J. Locsb, A. Korjakinsa // Construction and Building Materials, V.47, 2013, p. 274-281.
130. Limbachiya, M. Performance of granulated foam glass concrete / M. Limbachiya, M. S. Meddah, S. Fotiadou // Construction and Building Materials, V. 28, Is. 1, 2012, Pages 759–768.
131. Брыков, А. С. Ультрадисперсные кремнеземы в технологии бетонов: учебное пособие / А.С.Брыков // СПб.:СПбГТИ(ТУ), 2009. – 27.
132. 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: научный Интернет-журнал. М.: ЦНТ «НаноСтроительство».2012. №6. С. 41-56. URL: [http // www.nanobuild.ru](http://www.nanobuild.ru).
133. Кривенко, П. В. Щелочно-реакционные заполнители в щелочных бетонах / П. В. Кривенко, О. Н. Петропавловский, А. Г. Гелевера, Ю. В.Федоренко

// Материалы строительной конференции, НИИВМ Киевского национального университета строительства и архитектуры; выпуск 2010-1, с.81.

134. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны. М.:Стройиздат,1990.-400с.

135. Иванов, И. А. Легкие бетоны с применением зол электростанций. -М.: Стройиздат, 1986.-98с.

136. Ратинов, В. Б. Добавки в бетон / В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг // М.: Стройиздат, 1989.-186 с.

137. Руководство по применению химических добавок в бетоне. М.: СИ, 1981.-55с.

138. Эскуссон, К. К. Использование зол и шлаков в производстве ячеистых бетонов за рубежом // Строительные материалы. 1993. - № 8. - С. 18.

139. Лещинский, М. Ю. О применении золы-уноса в бетонах // Бетон и железобетон.-1987. №1. -С. 19-21.