

## СТРУКТУРА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ С КОМПЛЕКСНЫМИ ДОБАВКАМИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНОВ

*Л.Я. Крамар, М.В. Мордовцева, С.Н. Погорелов, И.М. Иванов*  
*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Современное строительство массивных сооружений и конструкций требует применения высокопрочных, долговечных и эффективных цементных бетонов. Для производства таких бетонов с целью получения требуемых свойств необходимо применение комплексных добавок, формирующих структуру цементного камня в бетоне, обеспечивающую ему необходимые прочностные и деформационные свойства. В результате проведенных исследований получены данные об изменении начального модуля упругости и коэффициента Пуассона бетонов без добавок и в зависимости от комплекса применяемых добавок суперпластификатор-микрокремнезем. Приведены данные о влиянии этих добавок на фазовый состав цементного камня в исследуемых бетонах, на прочность бетона при сжатии и его модуль упругости. Установлено, что добавки современных суперпластификаторов в сочетании с микрокремнеземом оказывают различное влияние на структурную составляющую цементного камня, изменяя коэффициент Пуассона, начальный модуль упругости бетона и его стойкость к воздействию нагрузок окружающей среды.

*Ключевые слова:* бетон каркасной структуры, структура цементного камня, суперпластификаторы, минеральный модификатор, призмная прочность, модуль упругости, коэффициент Пуассона.

### Введение

Современные высокофункциональные бетоны, предназначенные для возведения высотных зданий, подземных и промышленных сооружений, дорожных и аэродромных покрытий, подвергающиеся в процессе эксплуатации механическим циклическим нагрузкам, замораживанию – оттаиванию, увлажнению – высушиванию и другим воздействиям, требуют более тщательного подхода к оценке их свойств и устойчивости к повышенным и переменным нагрузкам при эксплуатации. Все эти воздействия, как правило, приводят постепенно к возникновению и активизации в бетонах неоднородностей, трещин и далее к развитию выщелачивания и коррозионных процессов, а также способствуют развитию ползучести и другим изменениям в цементном камне, вызывая в итоге разрушение. Поэтому для обеспечения долговечности, особенно высокофункциональных бетонов, необходимо проводить оценку их начального модуля упругости ( $E_0$ ). В настоящее время, в России, странах Европы, Британии, США, Австралии и других, как правило, модуль упругости назначают по прочности бетона при сжатии ( $R_{сж}$ ), в соответствии с нормативными документами [1–5]. По данным многих исследователей, современный способ определения  $E_0$  высокофункциональных бетонов, как  $1/3$  призмной прочности при сжатии, является недостаточно точным, так как бетон,

имея многокомпонентный состав, не является в полном смысле этого понятия однородным материалом [6].

Исследованиями последних десятилетий доказано, что в большей степени  $E_0$  бетона зависит от следующих основных факторов: количества и вида используемых крупного и мелкого заполнителей, вида вяжущего, В/Ц отношения, вида и количества добавок, возраста отверждения, плотности и прочности бетона. При этом прочность бетона оказывает значительно меньшее влияние на  $E_0$ , чем ранее перечисленные факторы [7–11]. Но до настоящего времени модуль упругости определяющий, принимая за основу показатель прочности.

Активное использование в бетонах современных органоминеральных добавок также не дает полного ответа на вопрос о роли цементного камня и его контактной зоны в формировании модуля упругости бетона ( $E_0$ ) [12–15]. Однако при воздействии на бетон окружающей среды наиболее уязвимой составляющей является цементный камень и контактная зона «заполнитель-цементный камень», что подтверждается величиной  $E_0$  бетона, которая находится в пределах 35...48 ГПа, в то время как крупный заполнитель имеет  $E_0 = 70$  ГПа и более [16]. Из этого следует, что все переменные нагрузки в большей степени способствуют разрушению клеевой составляющей, т. е. цементного камня.

На стойкость бетона к образованию трещин будет в значительной степени влиять непосредственно сам цементный камень и контактная зона «цементный камень – заполнитель». Учитывая это, многие исследователи отмечают, что фазовый состав цементного камня будет зависеть от особенностей и количества вводимых добавок: суперпластификаторов, модификаторов и др., но в этих работах не установлена четкая взаимосвязь между фазовым составом цементного камня и модулем упругости бетона [17–22]. Наиболее эффективным в настоящее время являются применение комплексных добавок, включающих микрокремнезем и суперпластификатор, которые позволяют в значительной степени повысить прочность, коррозионную стойкость бетонов и их выносливость под нагрузкой. Тем более что в настоящее время рынок предлагает большое количество разных добавок, значительно различающихся между собой по химическому составу, воздействию на цементное тесто, его гидратацию и формирование состава и структуры гидратных фаз.

Исходя из ранее сказанного и учитывая особенности формирования структуры и свойств бетонов, а также влияние на эти свойства гидратных фаз цементного камня, необходимо провести дополнительные исследования.

Целью настоящего исследования является изучение влияния различных комплексных добавок суперпластификатор (СП) + микрокремнезем (МК) на состав гидросиликатных фаз, особенности формирования структуры цементного камня и установление взаимосвязи этих характеристик с начальным модулем упругости бетона.

Для проведения исследований необходимо:

- 1) изучить влияние различных комплексов суперпластификатор + модификатор (МК) на структуру гидросиликатов цементного камня;
- 2) установить взаимосвязь структуры цементного камня в бетоне с его модулем упругости.

### Материалы и методы исследования

Для получения высокофункционального бетона и проведения оценки влияния различных добавок пластификаторов на начальный модуль упругости применяли следующие материалы:

– крупный заполнитель: гранодиоритовый щебень Новосмолинского карьера, соответствующий ГОСТ 8267-93 и ГОСТ 26633-2015: фракция (3-10) мм, морозостойкость – F400, R<sub>сж</sub> = 140 МПа, E<sub>0</sub> = 72 ГПа;

– песок кварцевый с модулем крупности 2,11, плотностью материала – 2620 кг/м<sup>3</sup> и насыпной плотностью – 1565 кг/м<sup>3</sup>, с содержанием пылеватых и глинистых – 1,9... 2,1 %;

– вяжущее – ЦЕМ I 42,5 Н, производства «Дюккерхофф Коркино цемент» с содержанием C<sub>3</sub>A ≤ 7 %, предел прочности при изгибе – 6,1 МПа.

– для проведения эксперимента использовали комплексные добавки СП + МК. В качестве высоко-

эффективных добавок-суперпластификаторов применяли нафталинформальдегидный суперпластификатор СП-1 фирмы Полипласт (Россия) и высокоредуцирующие суперпластификаторы: на основе поликарбоксилатов – Master Glenium SKY 591 и на основе эфира полиарила – Master Poly-Need 3045, фирмы BASF (Германия).

В качестве добавки модификатора принят микрокремнезем. В работе использовали новокузнецкий гранулированный микрокремнезем (МК), соответствующий ТУ 5743-048-02495332-1996 г., с пуццолановой активностью 1575 мг/г.

Все принятые для исследований добавки являются высокоэффективными и рекомендуются для использования в производстве ответственных сооружений из бетона и железобетона.

Исследования особенностей минералогического и фазового состава цементного камня бетона проводили с применением синхронного термического анализатора (СТА), совмещающего термогравиметрию (ТГ) и дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК). РФА проводили на рентгеновском аппарате фирмы Rigaku с гониометром Ultima IV In-plane, при U = 40 кВт, I = 30 мА и ширине выходной щели 10 мм. Особенности структуры цементного камня изучали с применением растрового электронного микроскопа Jeol JSM-7001F. Открытую пористость определяли по водопоглощению согласно ГОСТ 12730.3–2020 «Бетоны. Метод определения водопоглощения». Прочность бетона контролировали по ГОСТ 10180 «Методы определения прочности по контрольным образцам». Призмную прочность, модуль упругости и коэффициент Пуассона бетонов определяли в 28-суточном возрасте согласно ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона». Испытания проводили в сертифицированной лаборатории.

Все полученные результаты по составу гидратных фаз цементного камня в бетоне, изучаемые с применением дериватографии и рентгена, определяли с использованием справочников [23, 24] и открытой базы данных характеристик строительных минералов RRUFF [25].

### Исследовательская часть

Весь процесс исследования был разделен на две части. В первой изучали влияние комплексов различных СП с МК на структуру и свойства цементного камня. Во второй части исследования выявляли влияние принятых комплексов добавок на структуру и физико-механические свойства тяжелого бетона.

Исследования влияния на свойства цементного камня добавок «суперпластификатор + микрокремнезем» проводили в сравнении с контрольным образцом – без добавок. Образцы-кубики 20 × 20 × 20 мм изготавливали на цементном тесте нормальной густоты с комплексной добавкой,

включающей 1 % СП и 8 % МК. Образцы цементного камня твердели в нормальных условиях до 28 суток. Свойства цементного камня оценивали по прочности, пористости, содержанию свободного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и по количеству химически связанной воды.

Результаты исследования прочности цементного камня с добавками в сравнении с контрольными образцами представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Изучение влияние добавок на прочность цементного камня выявило, что наибольший эффект по приросту прочности проявляет комплекс на основе добавки Polyheed 3045 +МК.

Введение СП-1 и Glenium SKY 591 совместно с МК в первые сутки снижает набор прочности даже по сравнению с контрольным составом, но на вторые сутки прочность всех образцов составляет более 50 % от 28-суточной.

Скорость набора прочности контрольного, то есть образца без добавок, к 7-м суткам твердения резко падает и далее до 28 суток увеличивается только на 4,7 %, достигая 70,3 МПа. В то же время прочность образцов с добавками продолжает увеличиваться. Все комплексные добавки активизируют процесс гидратации и набора прочности цементного камня в основном до 7 суток. Цементный камень в зависимости от используемого комплекса СП + МК к 28-м суткам достигает 92–100 МПа, при этом наибольшее воздействие на набор прочности при сжатии оказывает суперпластификатор Polyheed 3045. Прочность цементного камня с этой добавкой к 28-м суткам достигает 100 МПа, по сравнению с контрольным образцом эта добавка позволяет увеличить прочность цементного камня на 30 %.

Исследование пористости цементного камня с разными добавками, рис. 2, позволяет выявить следующее.

Максимальную пористость имеет цементный камень без добавок. С увеличением времени твердения образцов цементного камня от 7 до 28 суток, независимо от вводимых добавок, происходит снижение пористости на 12,7 %. Введение добавок способствует снижению пористости цементного камня, по отношению к бездобавочному: на 17,4 % при использовании СП-1 + МК, на 22,2 % – Glenium SKY 591 + МК и на 28,5 % – Polyheed 3045 + МК. Следовательно, наименьшую пористость имеет цементный камень при введении с МК добавки Polyheed 3045, это подтверждается и его прочностными характеристиками.

Можно предположить, что вводимые в цементное тесто добавки оказывают влияние не только на физические характеристики цементного камня, но и на состав его гидратных фаз.

Данные исследования влияния комплексных добавок на содержание в цементном камне свободного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (рис. 3) подтверждают это предположение.

Из рис. 3 следует, что введение в цементное тесто добавок СП+МК приводит к снижению в цементном камне содержания гидроксида кальция, но в большей степени снижается содержание свободного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при введении комплекса Polyheed 3045+МК. Из этого следует, что применение добавки Polyheed 3045+МК формирует цементный камень из ГСК с пониженным содержанием кальция.

Результаты исследования количественного содержания химически связанной воды в цементном камне представлены на рис. 4.

Таблица 1

Изменение прочности при сжатии образцов цементного камня, твердевшего до 28 суток

Образец	$R_{сж}$ на 1-е сутки, МПа	$R_{сж}$ на 2-е сутки, МПа	$R_{сж}$ на 7-е сутки, МПа	$R_{сж}$ на 28-е сутки, МПа
Контрольный	39,6	61,2	67,5	70,3
СП-1 1 % МК 8 %	30,4	55,9	83,3	92,5
Glenium SKY 591 1 % МК 8 %	23,6	57,2	85,5	96,5
Polyheed 3045 1 % МК 8 %	38,7	67,5	92,0	100,0

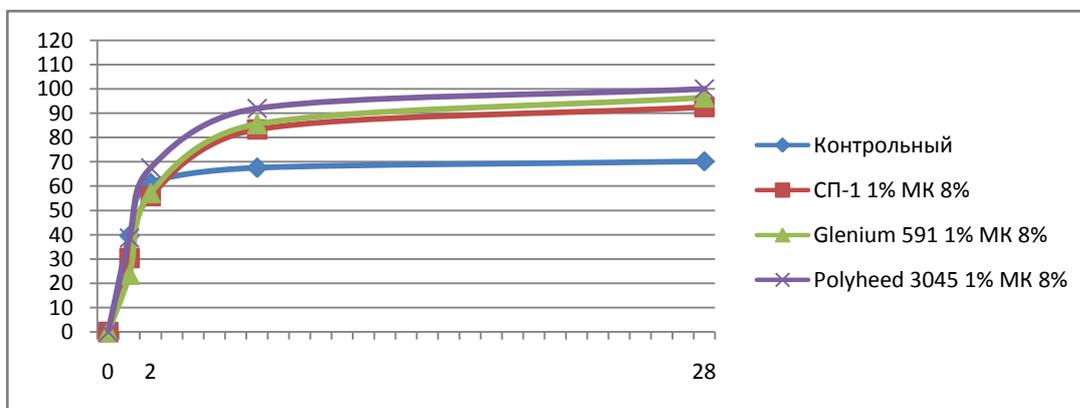


Рис. 1. Изменение прочности при сжатии образцов цементного камня при твердении

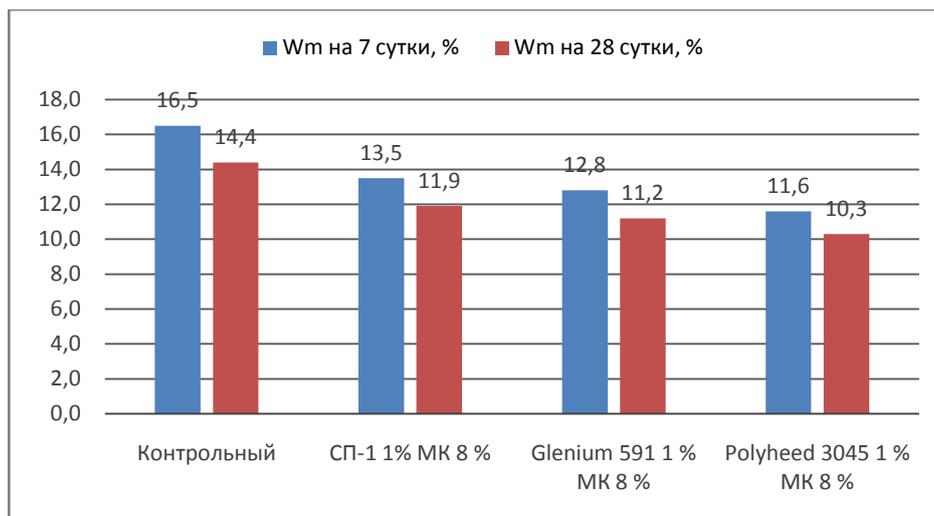


Рис. 2. Изменение пористости цементного камня в 7 и 28 суток твердения

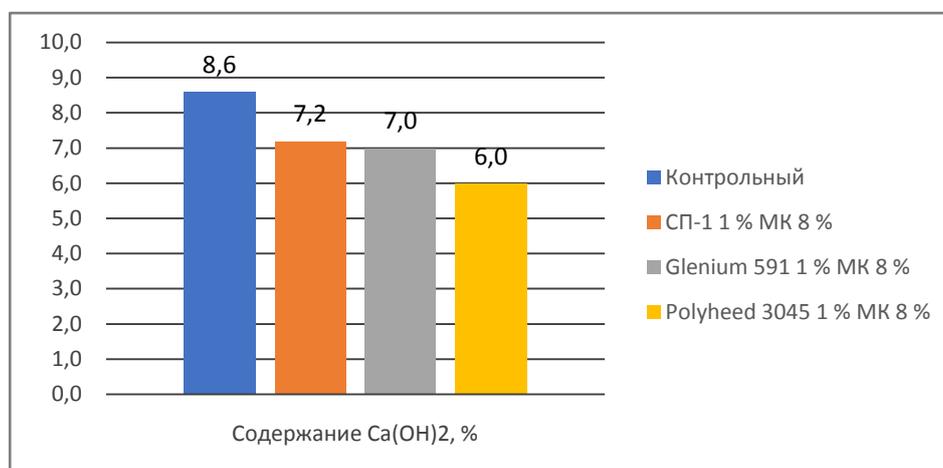


Рис. 3. Содержание свободного  $\text{Ca(OH)}_2$  в образцах цементного камня с различными добавками

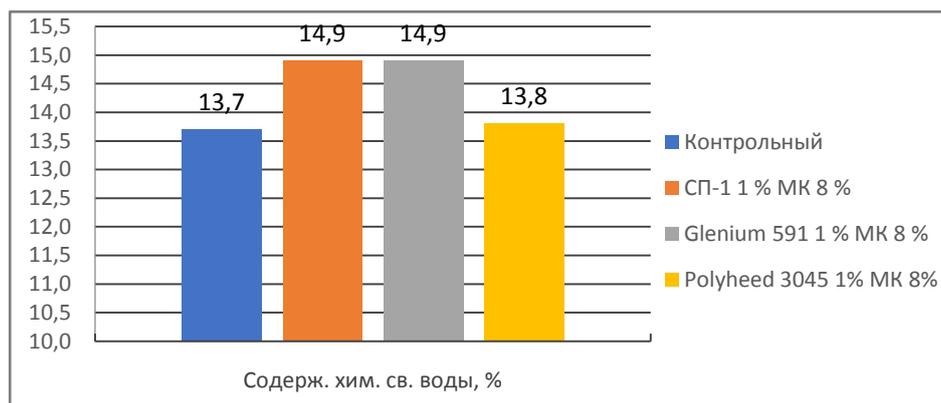


Рис. 4. Содержание химически связанной воды в цементном камне

Известно, что цементный камень без добавок формируется в процессе гидратации в основном высокоосновными ГСК. По данным исследований В.С. Горшкова, В.В. Тимашева, В.Г. Савельева и А.В. Абакумова, такие ГСК имеют соотношение  $\text{Ca/Si}$  от 1,5 до 2 и пониженное содержание химически связанной воды от 0,5 до 3 % [24, 25].

Введение в цементное тесто микрокремнезема формирует цементный камень предпочтительно из низкоосновных гидросиликатных фаз типа  $\text{C-S-H(I)}$ . Введение в цементы комплексных добавок, включающих СП-1 + МК и Glenium SKY 591 + МК, способствует формированию структуры цементного камня низкоосновными ГСК тоберморитового

типа, имеющих соотношение  $Ca/Si = 1,5...1$  и отличающихся несколько повышенным содержанием химически связанной воды, вследствие повышенного содержания в цементном камне низкоосновных ГСК.

Применение комплексной добавки Polyheed 3045 + МК способствует формированию структуры цементного камня в бетоне также из низкоосновных ГСК, но с меньшим содержанием оксида кальция и химически связанной воды. Гидросиликатные образования этого типа обеспечивают цементному камню еще и повышенную прочность. К таким ГСК относятся окенит, некоит, труксит, гиrolит и др. Эти гидросиликаты имеют соотношение  $Ca/Si < 1$ , и при нагревании до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  они подвергаются кристаллизации в псевдоволластонит при температуре  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а продуктом разложения тоберморитоподобных ГСК, кристаллизующихся при  $850...860\text{ }^{\circ}\text{C}$ , является волластонит. Таким образом, формируя структуру цементного камня в бетоне низкоосновными ГСК разного состава, можно влиять не только на химическую стойкость и прочность бетона, но и на его коэффициент Пуассона и модуль упругости ( $E_0$ ), а значит, и на поведение бетона под нагрузкой.

#### Изучение влияния исследуемых комплексных добавок на модуль упругости бетона и коэффициент Пуассона

На основе цементов с принятым комплексом добавок и цемента без добавок был рассчитан состав бетона с подвижностью П1. Для сохранения подвижности в бездобавочный состав вводили повышенное количество цемента. Далее из полученных бетонных смесей изготовили образцы кубы  $100 \times 100 \times 100$  мм и призмы  $100 \times 100 \times 400$  мм согласно ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона». После твердения бетонов в НУ в 28 суток проводили определение их прочности при сжатии, модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Полученные результаты внесены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что плотность исследуемых бетонов с разными добавками изменяется незначительно от 2337 до  $2349\text{ кг/м}^3$ . Прочность при сжатии бетонов находится на уровне от 76 МПа

для бездобавочного и от 82 до 90 МПа для бетонов с добавками. При рассмотрении призмочной прочности ( $R_{пр}$ ) установлено, что наименьшее ее значение имеют контрольный, бездобавочный бетон и бетон, включающий Polyheed 3045 + МК, а максимальной прочности 87,4 МПа и 90,4 МПа достигают бетоны с СП-1 + МК и Glenium SKY 591 + МК соответственно.

При расчете модуля упругости и определении коэффициента Пуассона установлено, что бетоны, включающие совместно с МК добавки СП-1 и Glenium SKY 591, имеют модуль упругости 48,4 ГПа, что на 10 % выше, чем у бездобавочного, и коэффициент Пуассона – 0,22, а структура цементного камня формируется низкоосновными, тоберморитоподобными ГСК.

Цементный камень контрольных образцов формируется в основном высокоосновными ГСК типа С-S-H(II), его коэффициент Пуассона достигает 0,24, а модуль упругости бетона на таком вяжущем составляет 43,7 ГПа. Введение в бетон комплекса Polyheed 3045 + МК повышает прочность при сжатии до 80 МПа, цементный камень формируется предпочтительно низкоосновными ГСК, но его модуль упругости составляет 43,9 ГПа, а коэффициент Пуассона имеет минимальное значение – 0,18. Из этого следует, что Polyheed 3045 повышает хрупкость гидратных фаз цементного камня в бетоне. Следовательно, поликарбонатные добавки различного состава способствуют формированию гидратных фаз с разными структурами и свойствами. Введение добавок Glenium SKY 591 и СП-1 с МК формируют структуру бетона упруго-пластичной, а добавка Polyheed 3045 + МК обеспечивает высокую марочную прочность бетона, но повышает хрупкость структуры, такое явление, вероятнее всего, зависит от фазового состава гидратных фаз цементного камня.

Таким образом, все рассматриваемые бетоны отличаются друг от друга только фазовым составом цементного камня, что и влияет в различной степени на их физико-химические и технические характеристики, а значит, и на долговечность.

К сожалению, применение рентгенофазового анализа не позволило найти принципиально убедительных доказательств различия в фазовом со-

Таблица 2

Влияние используемых комплексных добавок на плотность, прочность, модуль упругости и коэффициент Пуассона каркасного бетона

№	Состав образца	Плотность, $\text{кг/м}^3$	Прочность при сжатии, МПа	Призмочная прочность, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
1	Контрольный	2340	76,6	58,1	43709	0,24
2	Polyheed 3045 1 %, МК 8 %	2337	82,0	61,6	43898	0,18
3	СП-1 1 %, МК 8 %	2336	87,4	72,6	48446	0,22
4	Glenium SKY 591 1 %, МК 8 %	2349	90,4	74,4	48401	0,22

## Строительные материалы и изделия

стае гидратов, формирующих исследуемые материалы.

С целью подтверждения предположений относительно фазового состава гидратов и микроструктуры цементного камня было решено применить метод растровой электронной микроскопии. Для проведения исследований подготовили образцы-сколы изучаемых бетонов и провели в них микроанализ цементного камня. Рассмотрим последовательно особенности цементного камня бетонов без добавок и с комплексными добавками СП-1+ МК, Glenium SKY 591 + МК и Polyheed 3045 + МК.

Микроструктура цементного камня бетона без добавок (рис. 5) представлена в основном мелкокристаллическими гидросиликатными образованиями типа С-S-H(II) в виде пластинок, переплетенных и сросшихся призм, мельчайших зародышей, кроме этого, на всей поверхности сколов размещены мелкие и крупные кристаллические образования гидроксида кальция в виде гексагональных пластинок.

Введение в бетон комплексной добавки (СП-1 + МК) (рис. 6) способствует формированию цементного камня из плотных и аморфизированных гидратов пластинчатого строения типа С-S-H(I) фазы тоберморитоподобных ГСК разного вида с включениями в поровом пространстве гидроксида кальция в виде пластинок разного размера.

Введение добавки Glenium SKY 591+ МК еще эффективнее способствует формированию структуры цементного камня из низкоосновных ГСК типа С-S-H(I) пластинчатого строения, между которыми в небольшом количестве располагаются слабо закристаллизованные образования  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (рис. 7).

На рис. 8 представлен снимок поверхности скола цементного камня бетонного образца, полученного при введении комплекса добавок Polyheed 3045 + МК.

Поверхность скола бетона с этой добавкой так же, как и бетона с другими комплексами, формируется низкоосновными ГСК пластинчатой формы, но под воздействием разрушающей силы гидросиликаты, сформированные при гидратации под воздействием комплексной добавки Polyheed 3045 + МК, проявляют значительную хрупкость. В результате исследуемая поверхность покрыта слоем частиц-обломков, размер которых менее 1 мкм. Появление на поверхностях сколов мелкодисперсных неопределенной формы образований подтверждает высокую хрупкость сформированного цементного камня, а значит, и бетона.

Согласно данным источников [24, 25], по результатам ДТА и электронной микроскопии при использовании добавки Polyheed 3045 + МК можно предположить, что ее введение формирует цементный камень в бетоне из низкоосновных ГСК



Рис. 5. Микроструктура затвердевшего цементного камня в бетоне без добавок

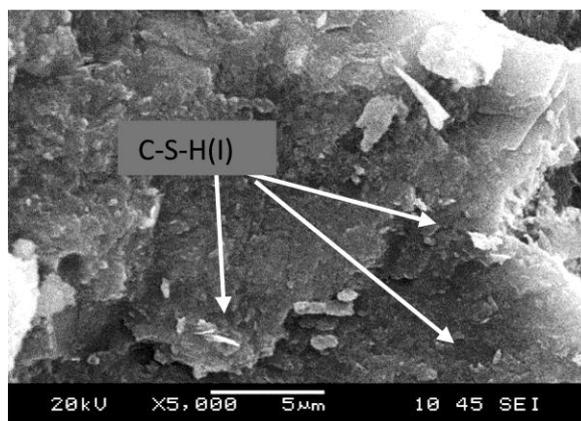
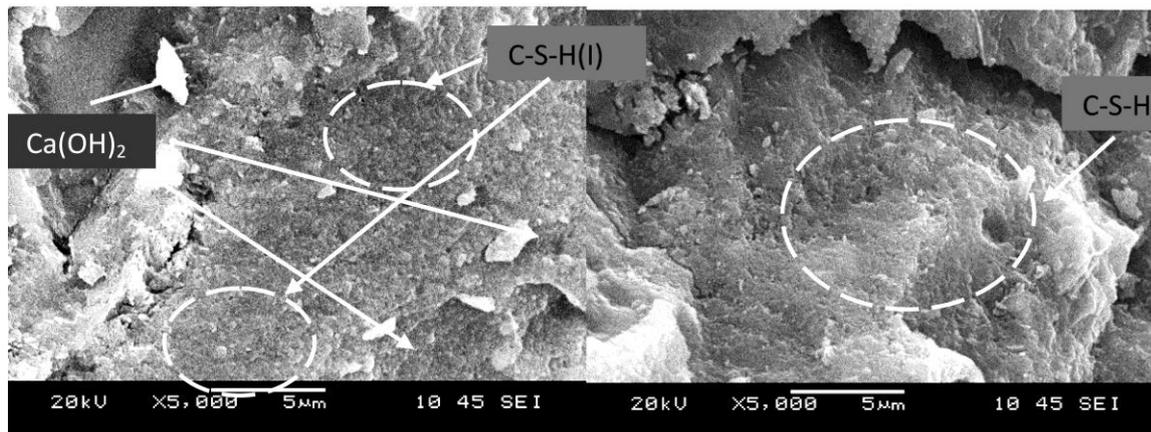


Рис. 6. Микроструктура затвердевшего цементного камня в бетоне с комплексной добавкой МК + СП-1

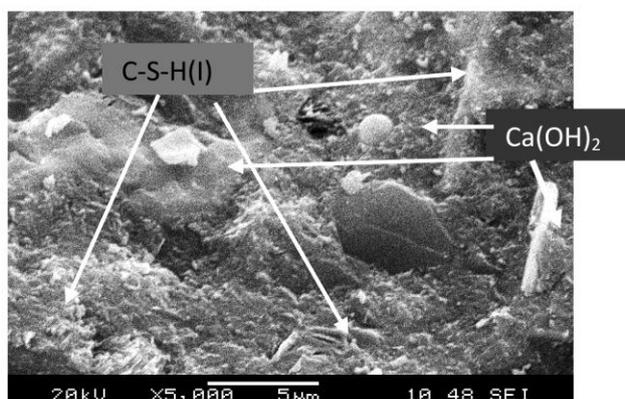
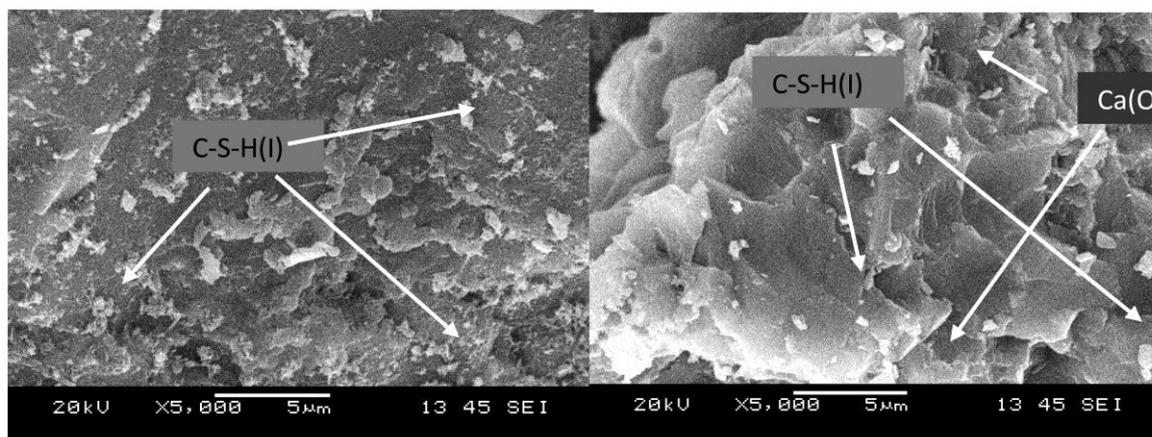


Рис. 7. Микроструктура затвердевшего цементного камня в бетоне с добавкой МК + GleniumSKY 591

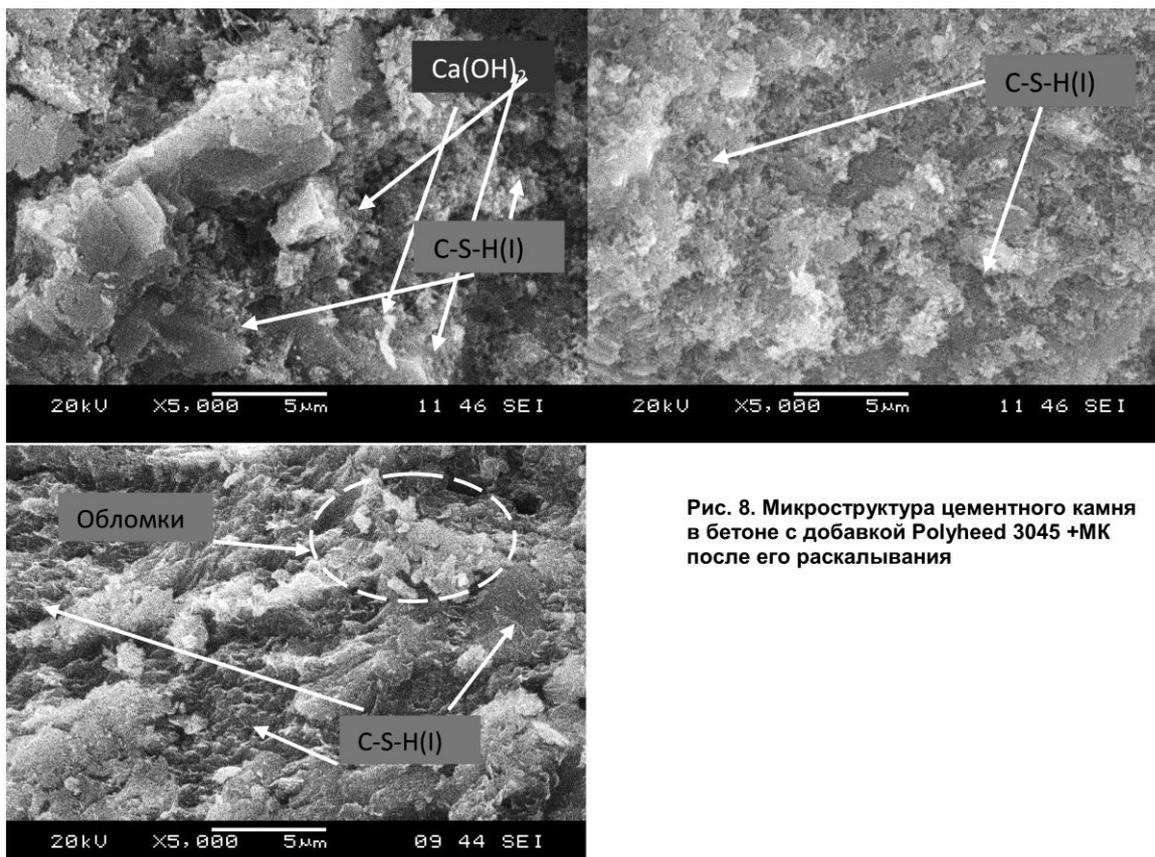


Рис. 8. Микроструктура цементного камня в бетоне с добавкой Polyheed 3045 +МК после его раскалывания

с отношением  $Ca/Si < 1$ . Эти образования отличаются высокой хрупкостью, представлены в виде тонких планок, волокон, игл, которые при  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  кристаллизуются, образуя на дериватограмме экзоэффект.

### Заключение

1. Установлено, что цементный камень, формирующий бетон без добавок, предпочтительно представлен высокоосновными ГСК типа C-S-H(II) с соотношением  $Ca/Si \geq 1,5$ , которые имеют коэффициент Пуассона 0,24, что повышает ползучесть такого материала и обеспечивает ему при подвижности П1 модуль упругости в пределах 43 ГПа.

2. Применение в производстве бетонов модификатора МК совместно с суперпластификаторами разного вида и состава способствует формированию цементного камня бетонов из низкоосновных ГСК, различающихся составом, структурой, содержанием  $CaO$ , а значит, с различными свойствами, что следует учитывать при применении таких бетонов в строительстве.

3. Использование в бетонах модификатора МК совместно СП-1 и Glenium SKY 591 способствует формированию структуры цементного камня из низкоосновных тоберморитоподобных ГСК, имеющих соотношение  $Ca/Si$  от 1,5 до 1, которые обеспечивают бетонам слоистую структуру, высокую прочность и упругость. Коэффициент Пуассона

на такой структуры составляет 0,22, модуль упругости на 10 % выше, чем у бетона без добавок, и составляет более 48 ГПа.

4. Использование комплекса Polyheed 3045 + МК также обеспечивает бетону высокую прочность, но способствует формированию структуры ГСК в цементном камне с отношением  $Ca/Si < 1$ , с пониженной основностью и хрупких, с коэффициентом Пуассона 0,18. Это обеспечивает бетону также повышенную прочность при сжатии, но его модуль упругости остается на уровне бетона без добавок.

### Литература

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.
2. American Concrete Institute (ACI). Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI Committee 318. Michigan: Farmington Hills, 2010.
3. Australian Standard (AS3600). Design Properties of Materials, Concrete Structures, Standards Association of Australia, 2001, p. 48.
4. British Standards Institution BS TN 12390-3. Testing Hardened Concrete, part.1 London: Compressive Strength of Test Specimens, 2009, p. 3.
5. Невсетаев, Г.В. Применение модификаторов с целью управления модулем упругости бетона / Г.В. Невсетаев // Новые научные направления строительного материаловедения: материа-

лы академических чтений РААСН. Ч. 2. Белгород, 2005. – С. 51–55.

6. Несветаев, Г.В. Самоуплотняющиеся бетоны: модуль упругости и мера ползучести / Г.В. Несветаев, А.Н. Давидюк // *Строительные материалы*. 2009. – № 6. – С. 68–71.

7. Несветаев, Г.В. Модуль упругости цементного камня с суперпластификаторами и органоминеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении / Г.В. Несветаев, Г.С. Кардунян // *Бетон и железобетон*. – 2013. – № 6. – С. 10–13.

8. О регулировании модуля упругости и ползучести высокопрочных бетонов с модификатором МБ-50С/ С.С. Каприелов, Н.И. Карпенко, А.В. Шейнфельд, Е.Н. Кузнецов // *Бетон и железобетон*. – 2003. – № 6. – С. 8–12.

9. ГОСТ 24452-80 Бетоны. Метод определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – М.: Стандартинформ, 2008. – 13 с.

10. Krizova, K. Evaluation of static modulus of elasticity depending on concrete compressive strength / K. Krizova, R. Hela // *Int J Civil Environmental Eng.* – 2015. – No. 9(5). – P. 656.

11. Берг О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 207 с.

12. Alexander, M.G. Aggregates in concrete – an assessment of their role / M.G. Alexander, D.E. Davis // *Concrete*. – 1991. – No. 59. – P. 10–20.

13. Influence of coarse aggregate on concrete's elasticity modulus / Dos Santos AC, De Arruda AM, Da Silva TJ et al. // *Acta Scientiarum Dent Tech*, 2017, no. 39, pp. 17–25.

14. Регулирование жесткости и прочности железобетонных балок варьированием модуля упругости бетона / Д.Р. Маулян, Г.В. Несветаев // *Вестник ТГАСУ*. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 86–91.

15. Несветаев, Г.В. О прочности бетона с каркасной структурой / Г.В. Несветаев, С.В. Халезин // *Науковедение*. – 2015. – Т. 7, № 3.

16. Структурообразование и разрушение цементных бетонов / В.В. Бабков, В.Н. Мохов, С.М. Капитонов, П.Г. Колохов. – Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2002. – 376 с.

17. Nassif, H.H. Effect of pozzolanic material and curing methods on the elastic modulus of HPC / H.H. Nassif, H. Najm, N. Suksawang // *Cement and Concrete Composites*. – 2005. – Vol. 27. – P. 661–670.

18. Тамразян, А.Г. Механика ползучести бетона: моногр. / А.Г. Тамразян, С.Г. Есаян. – М.: МГСУ, 2012. – 324 с.

19. Skalny, I. Physico-chemical Phenomena at the Cement Paste. Aggregate Interface / I. Skalny, S. Mindess // *10th Int. Symp. React. Solids, Dijon*, 27 Aug.–1 Sept. 1984.

20. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete / Karen L. Scrivener, Alison K. Crumby, P.L. Pratt // *Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Dec. 2–4, 1987, Pittsburgh (Pa) 1988*, pp. 87–88.

21. Деформационные свойства и параметрические точки бетонов каркасной структуры / Д.Р. Маулян, Г.В. Несветаев, С.В. Халезин, А.А. Горцевской // *Инженерный вестник Дона*. – 2018. – № 2 [Ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4941](http://Ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4941).

22. Degradation of Dynamic Elastic Modulus of Concrete under Periodic Temperature-Humidity Action / Depeng Chen, Jiajia Zou, Liang Zhao et al. // *Materials*. – 2020. – Vol. 13(3). – P. 611. DOI: 10.3390/ma13030611

23. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высш. школа, 1981. – 335 с.

24. Горшков, В.С. Вяжущие, керамика и стеклокристаллические материалы: Структура и свойства: справ. пособие / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, А.В. Абакумов. – М.: Стройиздат, 1995. – 576 с.

25. The power of databases the RRUFF project / B. Lafuente et al. // *Highlights in Mineralogical Crystallography*. – 2020. – [https:// rruff.info/](https://rruff.info/) (дата обращения 01.03.2022)

**Крамар Людмила Яковлевна**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), [kramar-l@mail.ru](mailto:kramar-l@mail.ru)

**Мордовцева Мария Витальевна**, магистр кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), [mariamordovtseva@mail.ru](mailto:mariamordovtseva@mail.ru)

**Погорелов Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), [srogorelov2@mail.ru](mailto:srogorelov2@mail.ru)

**Иванов Илья Михайлович**, аспирант кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), [ivanov.im@bk.ru](mailto:ivanov.im@bk.ru)

*Поступила в редакцию 20 апреля 2022 г.*

## THE STRUCTURE OF CEMENT STONE WITH COMPLEX ADDITIVES AND ITS EFFECT ON THE DEFORMATION PROPERTIES OF FRAME CONCRETE

L.Ya. Kramar, kramar-l@mail.ru

M.V. Mordovtseva, mariamordovtseva@mail.ru

S.N. Pogorelov, spogorelov2@mail.ru

I.M. Ivanov, ivanov.im@bk.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

The modern construction of massive structures and structures requires the use of high-strength, durable and efficient cement concretes. In order to obtain the required properties in the production of such concretes, it is necessary to use complex additives that form the structure of cement stone in concrete, providing the necessary strength and deformation properties. The studies provided data on changes in the initial modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete without additives and depending on the complex of superplasticizer-micro silica additives used. The study also provides data on the effect of these additives on the phase composition of cement stone, the compressive strength of concrete and its modulus of elasticity. The additives of modern superplasticizers in combination with micro silica are shown to have a different effect on the structural component of cement stone, changing the Poisson's ratio, the initial modulus of elasticity of concrete and its resistance to environmental loads.

*Keywords: concrete skeleton, cement stone structure, superplasticisers, mineral modifying additive, prism strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio.*

### References

1. SP 63.13330.2018. *Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruksii. Osnovnyye polozheniya* [Set of Rules 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 16 p.
2. [American Concrete Institute (ACI). Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI Committee 318]. Michigan, Farmington Hills Publ., 2010. 524 p.
3. [Australian Standard (AS3600). Design Properties of Materials, Concrete Structures]. Standards Association of Australia Publ., 2001, 48 p.
4. [British Standards Institution BS TN 12390-3. Testing Hardened Concrete. Part.1. Compressive Strength of Test Specimens]. London, 2009, 3 p.
5. Nesvetayev G.V. [Application of Modifiers to Control the Modulus of Elasticity of Concrete. New Scientific Directions of Construction Materials Science]. *Materialy akademicheskikh chteniy RAASN. Ch. 2* [Materials of Academic Readings of the RAASN. Part 2.]. Belgorod, 2005, pp. 51–55. (in Russ.)
6. Nesvetayev G.V., Davidyuk A.N. [Self-Compacting Concretes: Modulus of Elasticity and Creep Measure]. *Stroitel'nyye materialy* [Building materials], 2009, no. 6, pp. 68–71. (in Russ.)
7. Nesvetayev G.V., Kardumyan G.S. [Modulus of Elasticity of Cement Stone with Superplasticizers and Organomineral Modifiers Taking into Account its Own Deformations During Hardening]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2013, no. 6, pp. 10–13. (in Russ.)
8. Kapriyev S.S., Karpenko N.I., Sheynfel'd A.V., Kuznetsov E.N. [Regulation of Modulus of Elasticity and Creep of High-Strength Concrete with Modifier MB-50C]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2003, no. 6, pp. 8–12. (in Russ.)
9. GOST 24452-80 *Betony. Metod opredeleniya prizmennoy prochnosti, modulya uprugosti i koeffitsiyenta Puassona* [State Standard 24452-80/ Concretes. Methods of Prismatic, Compressive Strength, Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio Determination]. Moscow, Standartinform Publ., 2008, p. 13.
10. Krizova K., Hela R. [Evaluation of Static Modulus of Elasticity Depending on Concrete Compressive Strength]. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2015, vol. 9, no. 5, pp. 654–657.
11. Berg O.Ya., E.N Shcherbakov, G.N. Pisanko [High-Strength Concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971. 207 p.
12. Alexander M.G., Davis D.E. [Aggregates in Concrete – an Assessment of their Role]. *Concrete*, 1991, no. 59, pp. 10–20.
13. Dos Santos A.C., De Arruda A.M., Da Silva T.J., De Carvalho Palma, Vitor P., Trautwein L.M. [Influence of Coarse Aggregate on Concrete's Elasticity Modulus]. *Acta Scientiarum Dent Tech*, 2017, no. 39, pp. 17–25.

14. Mailyan D.R., Nesvetayev G.V. [Regulation of Rigidity and Strength of Reinforced Concrete Beams by Varying the Modulus of Elasticity of Concrete]. *Vestnik TGASU* [Bulletin of TSASU], 2018, vol. 20, no. 4, pp. 86–91. (in Russ.)
15. Nesvetayev G.V., Khalezin S.V. [On the Strength of Concrete with a Frame Structure]. *Naukovedeniye* [Science Studies], 2015, vol. 7, no. 3, pp. 1–10. (in Russ.)
16. Babkov V.V., Mokhov V.N., Kapitonov S.M., Komokhov P.G. *Strukturoobrazovaniye i razrusheniye tsementnykh betonov* [Structure Formation and Destruction of Cement Concretes]. Ufa, GUP “Ufimskiy poligraf-kombinat” Publ., 2002. 376 p.
17. Nassif H.H., Najm H., Suksawang N. [Effect of Pozzolan Material and Curing Methods on the Elastic Modulus of HPC]. *Cement and Concrete Composites*, 2005, no. 27, pp. 661–670.
18. Tamrazyan, A.G. Esayan S.G. *Mekhanika polzuchesti betona: monografiya* [Mechanics of Concrete Creep: Monograph]. Moscow, MGSU Publ., 2012, 324 p.
19. Skalny I., Mindess S. [Physico-Chemical Phenomena at the Cement Paste. Aggregate Interface]. *10th Int. Symp. React. Solids, Diyon, 27 Aug. – 1 Sept., Diyon, 1984*, pp. 223–224.
20. Scrivener Karen, Crumby L., Flison K., Pratt P.L. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete. *MRS Online Proceedings Library*. 114, 87 (1987). DOI: 10.1557/PROC-114-87
21. Mailyan D.R., Nesvetayev G.V., Khalezin S.V. Gortsevskoy A.A. [Deformation Properties and Parametric Points of Concrete Frame Structure]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2018, no. 2 Available at: [Ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4941](http://Ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4941). (in Russ.)
22. Depeng Chen, Jiajia Zou, Liang Zhao, Shidai Xu, Tengfei Xiang [Degradation of Dynamic Elastic Modulus of Concrete under Periodic Temperature-Humidity Action]. *Materials*, 2020, vol. 13, iss. 3, p. 611. DOI: 10.3390/ma13030611
23. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savel'yev V.G. *Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv* [Methods of Physical and Chemical Analysis of Binders]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1981. 335 p.
24. Gorshkov V.S., Savel'yev V.G., Abakumov A.V. *Vyazhushchiye, keramika i steklokristallicheskiye materialy: Struktura i svoystva: Spravochnoye posobiye* [Binders, Ceramics and Glass-Crystalline Materials. Structure and Properties]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1995. 576 p.
25. Barbara Lafuente, Downs R.T., Yang H., Stone N. The Power of Databases: The RRUFF Project. *Highlights in Mineralogical Crystallography*, 2020. Available at: <https://rruff.info/> (accessed 01.03. 2022)

Received 20 April 2022

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Структура цементного камня с комплексными добавками и ее влияние на деформационные свойства бетонов / Л.Я. Крамар, М.В. Мордовцева, С.Н. Погорелов, И.М. Иванов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 35–45. DOI: 10.14529/build220304

#### FOR CITATION

Kramar L.Ya., Mordovtseva M.V., Pogorelov S.N., Ivanov I.M. The Structure of Cement Stone with Complex Additives and its Effect on the Deformation Properties of Frame Concrete. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2022, vol. 22, no. 3, pp. 35–45. (in Russ.). DOI: 10.14529/build220304