



УДК: 691.175.743

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.5

EDN: EANJZS

Прочностные и деформативные свойства мелкозернистого бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего

Х.А. Кайс¹, Н.Н. Морозова², О.В. Хохряков², Р.К. Низамов^{2,3}

¹Университет Саны, г. Сана, Республика Йемен

²Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

³Академия наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Наиболее важными показателями мелкозернистого бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего, позволяющими расширить возможности его применения в несущих строительных конструкциях зданий, являются прочностные и деформативные свойства. Особенно это актуально для конструкций, которые эксплуатируются в условиях жаркого тропического климата Республики Йемен и будут находиться в сложном напряженно-деформированном состоянии. С другой стороны, низкая способность гипсоцементно-пуццоланового бетона выдерживать воздействие влаги, проникающей в «тело» бетона вместе с агрессивными веществами из окружающей среды, очевидно, будет приводить к потере его первоначальных свойств. Цель работы – определение прочностных и деформативных свойств гипсоцементно-пуццоланового бетона и установление их взаимосвязи с учетом его низкой водостойкости. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать составы мелкозернистых гипсоцементно-пуццолановых бетонов; изучить их механические свойства и установить классы бетона по прочности; определить модуль упругости мелкозернистого гипсоцементно-пуццоланового бетона в зависимости от классов по прочности на сжатие В20-В45; установить зависимости между такими свойствами как прочность на сжатие (кубиковая и цилиндрическая), растяжение при изгибе, осевое растяжение, начальный модуль упругости и начальный коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

Результаты. В работе представлены результаты исследования шести различных составов гипсоцементно-пуццоланового бетона, отличающихся классом прочности на сжатие (В20-В45). Установлено, что кубиковая прочность при сжатии изменяется от 25 до 60 МПа, прочность на растяжение при изгибе – от 3,0 до 6,2 МПа, предел прочности на осевое растяжение – от 1,9 до 3,4 МПа, цилиндрическая прочность на осевое сжатие – от 21,7 до 52,5 МПа, модуль упругости – от 18,9 до 28,2 ГПа и коэффициент Пуассона – от 0,16 до 0,24. При этом коэффициент размягчения, определяющий водостойкость гипсоцементно-пуццолановых бетонов, оказался весьма высоким – от 0,75 до 1,17.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что мелкозернистые гипсоцементно-пуццолановые бетоны незначительно уступают аналогичным классам бетонов на основе портландцемента, что позволяет их рекомендовать для производства изделий и конструкций, применяющихся в несущих каркасах зданий.

Ключевые слова: гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, прочность на сжатие, прочность на растяжение при изгибе, прочность на осевое растяжение, цилиндрическая прочность, модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент размягчения

Для цитирования: Кайс Х.А., Морозова Н.Н., Хохряков О.В., Низамов Р.К. Прочностные и деформативные свойства мелкозернистого бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Известия КГАСУ, 2025, № 1(71), с. 51-66, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.5, EDN: EANJZS

Strength and strain-stress properties of fine-grained concrete based on gypsum-cement-pozzolan binder

H.A. Qais¹, N.N. Morozova², O.V. Khokhryakov², R.K. Nizamov^{2,3}

¹Sana'a University, Sana'a, Republic of Yemen

²Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

³Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The most important indicators of fine-grained concrete based on gypsum-cement-pozzolan binder, which expand the possibilities of its use in load-bearing structures of buildings, are strength and deformation properties. This is especially true for structures that are operated in the hot tropical climate of the Republic of Yemen and will be in a complex stress-strain state. On the other hand, the low ability of gypsum-cement-pozzolan concrete to withstand the effects of moisture penetrating into the “body” of concrete along with aggressive substances from the environment will obviously lead to the loss of its original properties.

The purpose of the work is to determine the strength and deformation properties of gypsum-cement-pozzolan concrete and establish their relationship, taking into account its low water resistance. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: to develop compositions of fine-grained gypsum-cement-pozzolan concrete; to study their mechanical properties and establish concrete strength classes; to determine the modulus of elasticity of fine-grained gypsum-cement-pozzolan concrete depending on the compressive strength classes B20-B45; to establish relationships between properties such as compressive strength (cubic and cylindrical), flexural tension, axial tension, initial modulus of elasticity and initial coefficient of transverse deformation (Poisson ratio).

Results. The paper presents the results of a study of six different compositions of gypsum-cement-pozzolan concrete, differing in compressive strength class (B20-B45). It was found that cubic compressive strength varies from 25 to 60 MPa, flexural tensile strength from 3.0 to 6.2 MPa, axial tensile strength from 1.9 to 3.4 MPa, cylindrical axial compressive strength from 21.7 to 52.5 MPa, elastic modulus from 18.9 to 28.2 GPa and coefficient of Poisson ratio was from 0.16 to 0.24. At the same time, the softening coefficient, which determines the water resistance of gypsum-cement-pozzolan concrete, turned out to be very high - from 0.75 to 1.17.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that fine-grained gypsum-cement-pozzolan concretes are slightly inferior to similar classes of Portland cement-based concretes, which allows them to be recommended for the production of products and structures used in load-bearing building frames.

Key words: gypsum cement-pozzolan binder, compressive strength, flexural tensile strength, axial tensile strength, cylindrical strength, modulus of elasticity, Poisson ratio, softening coefficient

For citation: Qais H.A., Morozova N.N., Khokhryakov O.V., Nizamov R.K. Strength and strain-stress properties of fine-grained concrete based on gypsum-cement-pozzolan binder // News of KSUAE, 2025, № 1(71), p. 51-66, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.5, EDN: EANJZS

1. Введение

Одним из основных показателей строительных материалов является долговечность [1-3], выражаемая в сохранении физико-механических свойств и эстетичного внешнего вида с течением времени, что для конечного потребителя зачастую становится решающим фактором при их выборе.

Высокие темпы развития строительной отрасли, которые наблюдаются в последние годы в Республике Йемен, стимулируют активную разработку местной сырьевой базы. В частности, это касается месторождений природных кварцевых песков, которые широко применяют в качестве мелких заполнителей для различных видов многокомпонентных

бетонов. Особый интерес представляют песчаные (мелкозернистые) бетоны, которые по сравнению с крупнозернистыми обладают способностью воспринимать значительные растягивающие и изгибающие усилия, высокой призмочной прочностью, повышенными морозостойкостью и водонепроницаемостью. Отсутствие в них крупного заполнителя обеспечивает образование однородной структуры, что облегчает приготовление, укладку и формование бетонной смеси. Кроме этого, мелкозернистый бетон весьма технологичен, легко и эффективно модифицируется с помощью органоминеральных добавок, позволяя производить изделия и конструкции с различным комплексом технических показателей [4, 5]. Известно, что песчаные (мелкозернистые) бетоны приходится применять взамен крупнозернистых из-за дефицита крупных заполнителей в регионах.

Учитывая сложную политическую обстановку и природно-климатические условия Республики Йемен, сегодня наиболее востребованным оказывается производство изделий и конструкций на основе песчаных бетонов с использованием гипсоцементно-пуццолановых вяжущих (ГЦПВ). Они позволяют в относительно короткие сроки производить изделия и застраивать свободные территории городов и поселков, обеспечивая местное население с небольшим уровнем дохода доступным жильём. ГЦПВ и бетоны на его основе получили широкое распространение благодаря высоким эксплуатационным показателям: по прочности, огнестойкости, тепло- и звукоизоляционным свойствам и интенсивной кинетике твердения в первые часы.

При проектировании зданий и сооружений из песчаных бетонов с ГЦПВ оказалось, что недостаточно изучены их прочностные и деформативные свойства (сопротивление осевому сжатию, модуль упругости и др.), которые, как известно [6], устанавливаются в качестве начальных характеристик, определяющих безопасность, эксплуатационную пригодность и долговечность различных конструктивных элементов. Прочностные и деформативные свойства бетона, как правило, зависят от свойств заполнителя, фракционирования и его содержания, плотности упаковки зерен, активности цементного вяжущего, вида минеральных добавок и др. [7-9].

Первостепенным показателем деформативных свойств бетона является начальный модуль упругости, являющийся коэффициентом пропорциональности нормального напряжения к соответствующей ему относительной продольной упруго-мгновенной деформации при осевом сжатии испытываемого образца. Модуль упругости рассчитывается при получении кривой напряжения-деформации (рис. 2), которая на начальном этапе при относительно невысокой нагрузке (30 % от предела прочности) имеет практически линейную зависимость [10-12]. При этом в некоторых европейских странах модуль упругости принято определять при ином уровне нагружения, например, в Германии при 40 %, а в Норвегии при 60 %. На этом этапе бетон характеризуется упругими свойствами без влияния ползучести и с возникновением напряжений, весьма незначительных по величине. По этим причинам начальный модуль упругости принято относить к статическому модулю упругости, оцениваемому при заданном уровне напряжения начальной касательной, касательной и секущей линиями (рис. 1).

В дальнейшем при возрастающей нагрузке кривая напряжения-деформации приобретает нелинейный вид, особенно при возникновении эффектов ползучести и усадки. В этом случае начальный касательный модуль можно считать мерой динамического модуля упругости – величина, устанавливающая связь между скоростью распространения продольных колебаний, коэффициентом Пуассона и средней плотностью бетона. На рис. 2 представлен ряд факторов, которые влияют на модуль упругости бетона.

По мнению некоторых авторов [13-15], бетоны на ГЦПВ по деформативным свойствам обладают рядом преимуществ, что позволяет рекомендовать их для изготовления несущих конструкций по сравнению с бетонами на основе строительного гипса. Также бетоны на ГЦПВ имеют относительно низкий модуль упругости, чем равнопрочные бетоны на портландцементе. Несмотря на это, как отмечается в [13], с уменьшением содержания цемента и высокой доли минеральной добавки в составе ГЦПВ при повышенной влажности разница между модулями упругости бетонов на этом вяжущем и на портландцементе возрастает.

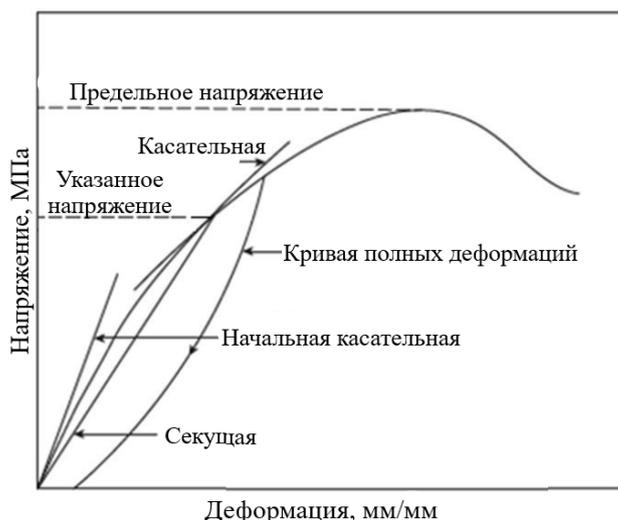


Рис.1. Кривая напряжения-деформации с различными видами модуля упругости бетона [10]
 Fig. 1. Stress-strain curve with different types of elastic modulus of concrete [10]



Рис.2. Факторы, влияющие на модуль упругости бетона [10]
 Fig. 2. Factors influencing the modulus of elasticity of concrete [10]

В наибольшей степени влияние на прочностные и деформативные свойства бетонов на ГЦПВ оказывает их низкая водостойкость и высокая водопроницаемость. Влага проникает в «тело» бетона вместе с агрессивными веществами из окружающей среды, которые вступают в реакцию с составляющими вяжущего и приводят к потере его первоначальных свойств (прочности, модуля упругости и др.), вызывает коррозию стальной арматуры и, в итоге, снижает долговечность. В связи с этим для её повышения применяют различные модификаторы, например, минеральные наполнители с пуццолановым эффектом [13, 16, 17], пластифицирующие добавки [18-20], кристаллизационные добавки [21] и др. Благодаря этим добавкам обеспечивается возможность получения бетонов с высокими эксплуатационно-техническими характеристиками, главным образом, с повышенной водостойкостью ($K_p \geq 0,8$).

На основании вышеизложенного целью работы было определение и установление взаимосвязи прочностных и деформативных свойств бетонов на основе ГЦПВ с учетом требований, предъявляемых к нему по водостойкости. Для этого решали следующие задачи: разработка различных составов мелкозернистых гипсоцементно-пуццолановых бетонов; изучение механических свойств различных составов мелкозернистых

гипсоцементно-пуццолановых бетонов; определение модуля упругости мелкозернистого гипсоцементно-пуццоланового бетона в зависимости от классов по прочности В20-В45; установление зависимостей между такими свойствами как прочность на сжатие (кубиковая и цилиндрическая), растяжение при изгибе, осевое растяжение, начальный модуль упругости и начальный коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

2. Материалы и методы

Для приготовления ГЦПВ использовали гипсовое и цементное вяжущие, а также два вида пуццолановых минеральных добавок (природный цеолит и микрокремнезем):

- гипсовое вяжущее (ГВ): марки Г-5 производства ООО «Developer a nation» (Республика Йемен), соответствующего ГОСТ EN 13279-1:2008, а физико-механические свойства которого представлены в табл. 1;

- цементное вяжущее – это портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н «Amran cement» (Республика Йемен), удовлетворяющий ГОСТ ASTM C 150 – TYPE 1, минеральный состав по паспорту качества представлен в табл. 2, а его физико-механические свойства – табл. 3.

- природный цеолит (ЦЕО), в виде мелкозернистого материала светло-зеленого цвета с наибольшим размером зерен 1 мм, выпускаемый предприятием «Yemen zeolite» в г. Сана Республика Йемен, перед применением высушивали до постоянной массы и измельчали до удельной поверхности 6500 ± 100 $\text{см}^2/\text{г}$, которую определяли по воздухопроницаемости (метод Козеини – Кармана), а пуццолановая активность по поглощению СаО составила 815 мг/г;

- микрокремнезем (МиК) был взят с Саудовского металлургического комбината «BUILMIX» - это дисперсный продукт с частицами сферической формы размером 0,01-0,1 мкм, его удельная поверхность – 38000 ± 500 $\text{см}^2/\text{г}$ и пуццолановая активность – 1210 мг/г. Химические составы природного цеолита, микрокремнезема и портландцемента представлены в табл. 4.

Таблица 1

Физико-механические свойства гипсового вяжущего

№	Наименование показателя	Ед. изм.	Значение показателя
1	Тонкость помола, остаток на сите № 02	%	4,5
2	Нормальная густота	%	55
3	Сроки схватывания: - начало - конец	мин.	6 12
4	Предел прочности при изгибе: - через 2 часа - в высушенном до постоянной массы состоянии	МПа	2,9 5,5
5	Предел прочности при сжатии: - через 2 часа - в высушенном до постоянной массы состоянии	МПа	5,35 13,8
6	Коэффициент размягчения	-	0,31

Таблица 2

Минералогический состав портландцемента

Наименование цемента	Минеральный состав клинкера, %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
«Amran cement» (ЦЕМ I 42,5Н)	53,8	20,9	6,4	12,04

Таблица 3

Физико-механические свойства портландцемента

№	Наименование показателя	Ед. изм.	Значение показателя
1	Нормальная плотность	%	27-28
2	Сроки схватывания цементного теста: - начало - конец	час-мин	2-55 3-40
3	Тонкость помола (проход через сито с сеткой № 008)	%	94
4	Предел прочности в возрасте 28 суток: - при сжатии - при изгибе	МПа	48,5 7,0
5	Прочность при сжатии после пропаривания	МПа	38,4
6	Равномерность изменения объема	-	выдерживает

Таблица 4

Химический состав портландцемента и минеральных добавок

Наименование материала	Количество, %									
	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	SO ₃
ПЦ	20,59	63,35	2,94	3,77	-	4,96	-	-	-	1,96
ЦЕО	71,3	0,89	0,43	3,44	0,99	11,12	2,69	0,22	0,02	-
МиК	53,8	5,7	2,3	5,2	0,6	26,72	0,7	1,4	-	-

Для повышения прочностных и деформативных свойств мелкозернистых бетонов применяли базальтовую фибру (БАЗ) производства ООО «Arab Basalt Fiber Company» г. Фуджайра (ОАЭ). Она представляла собой короткие отрезки непрерывного базальтового волокна, собранные во временные пучки (монофиламенты). Свойства фибры представлены в табл. 5.

Таблица 5

Свойства базальтовой фибры

Диаметр, мкм	Длина, мм	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент удлинения, %	Температура плавления, °С	Плотность, г/см ³
13-18	3-50	3700	Не менее 75	3,2	1550	2,8

В качестве химических добавок (ХД) использовали суперпластификатор «Master Glenium 112» производства Master Builders Solutions «MBCC-GROUP» (Германия) и гидрофильную кристаллическую добавку «Flocrete WP Crystal» с оптимальными дозировками соответственно 1,5 и 2 % от массы ГЦПВ, установленных ранее в [19, 21].

Для приготовления ГЦПВ-бетонов в качестве мелкого заполнителя использовали нефракционированный природный кварцевый песок и два вида песка, рассеянных по фракциям. Соотношение ГЦП-вяжущего к песку (П) принято 1:1 и 1:2. Физические свойства песков представлены в табл. 6.

Таблица 6

Физические свойства нефракционированного и фракционированных кварцевых песков

Наименование песка	Содержание фракций, %					Насыпная плотность, кг/м ³	Пустотность, %	Модуль крупности
	2,5-1,25 мм	1,25-0,63 мм	0,63-0,315 мм	0,315-0,16 мм	< 0,16 мм			
Песок №1	природный, нефракционированный					1605	39,4	2,4
Песок №2	70	15	5	5	5	1665	36,4	3,4
Песок №3	55	10	10	20	5	1634	38,3	2,9

В работе определяли нормальную плотность ГЦПВ-теста по ГОСТ 23789–2018 с помощью стандартного прибора Суттарда; в соответствии с ГОСТ 10180-2012 определяли прочность на сжатие через 28 суток твердения на образцах-кубах с размерами 150×150×150 мм; прочность на растяжение при изгибе и прочность на осевое растяжение на образцах-призмах с размерами 100×100×400 мм. Все контрольные образцы,

изготовленные в металлических формах, через 40-50 минут после твердения при комнатной температуре (20 ± 5) °С распалубливали и помещали в камеру нормального твердения при температуре (20 ± 2)°С и влажности (95 ± 5)% на хранение до установленного срока испытания. Образцы на прочность испытывали на прессе YAW-3000 (Китай), оснащенного специализированной программой.

Водостойкость ГЦП-бетона оценивали по коэффициенту размягчения, который рассчитывали делением прочности при сжатии образцов-кубов после водонасыщения в течение 24 ч к прочности образцов-кубов в сухом состоянии.

Деформативные свойства образцов бетона определяли по прочности на сжатие образцов-цилиндров размером 150×300 мм, модулю упругости и коэффициенту Пуассона. Модуль упругости определяли с помощью экстензометра, который прикрепляли к образцу в соответствии с рекомендациями ГОСТ 24452-2023 и ASTM-C469M-14. Перед исследованием цилиндрические образцы подготавливали путем нанесения на торцевые поверхности выравнивающего слоя из высокопрочного гипсового вяжущего (рис. 3А и 3Б). Проверку ровности нанесенного слоя осуществляли пузырьковым уровнем.

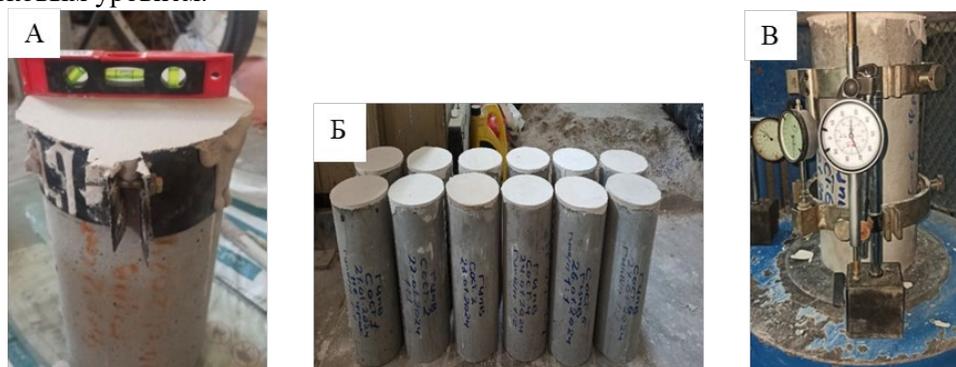


Рис. 3. Подготовка образцов-цилиндров для исследования (иллюстрация авторов)
Fig. 3. Preparation of cylindrical samples for research (illustration by the authors)

Общий вид установки со стальными креплениями и часовыми индикаторами для измерения деформаций с точностью 0,001 мм показан на рис. 3В. Для фиксации индикаторов использовали приспособления в виде стальных рамок, которые закрепляли на образце-цилиндре с помощью четырех упорных винтов – по два с противоположных сторон образца.



Рис.4. Характер разрушения образца-цилиндра при сжатии
слева – в процессе нагружения, справа – после разрушения (иллюстрация авторов)
Fig. 4. The nature of destruction of a cylindrical specimen under compression
left – during loading, right – after destruction (illustration by the authors)

Испытание образца-цилиндра на осевое сжатие выполняли при постоянной скорости нагружения ($0,6 \pm 0,2$) МПа/с. При этом оценивали характер его разрушения по внешнему виду (рис. 4). Нагружение образца сопровождалось образованием на его поверхности продольных трещин и частичным отслоением боковой поверхности. В целом, разрушение соответствует «удовлетворительной схеме» согласно ГОСТ 10180-2012 (приложение Е).

В процессе испытаний образцов цилиндров установлено, что при увеличении времени действия нагрузки количество непрерывно развивающихся трещин уменьшается.

3. Результаты и обсуждение

Первоначально определено оптимальное содержание воды для затворения ГЦПВ-бетонов с химическими добавками (Flocrete WP Crystal, Master Glenium 112) и базальтовой фиброй из условия получения равноподвижных смесей (диаметр расплыва по Суттарду 185 ± 5 мм). Составы бетонов, имеющих разные значения В/Т и ГЦПВ:П, представлены в табл.7

Таблица 7

Составы мелкозернистого ГЦПВ-бетона

Условное обозначение состава	№ песка по табл. 3	В/Т	ГЦПВ:П	Вид и содержание химдобавок в % от массы ГЦПВ		БАЗ, % от массы бетона
				Flocrete WP Crystal	Master Glenium 112	
C0	№1	0,33	1:1	-	1,5	-
C1	№2	0,274	1:1	-	1,5	-
C2		0,29	1:2	-	1,5	-
C3		0,265	1:1	2	1,5	-
C4		0,285	1:1	2	1,5	0,6
C5	№3	0,282	1:1	-	1,5	-

Изготовленные образцы из составов ГЦПВ-бетона твердели в нормально-влажностных условиях в течение 180 суток. В этот период времени были определены коэффициент размягчения, средняя плотность и прочность на сжатие. Результаты испытаний приведены в табл. 8 и на рис. 5.

Таблица 8

Свойства мелкозернистых ГЦПВ-бетонов

Условное обозначение составов	Коэффициент размягчения и средняя плотность (кг/м ³) в возрасте, сут							
	1	3	7	14	28	48	90	180
	C0	0,68 1982	0,7 1989	0,73 1993	0,74 2005	0,75 1995	0,77 1997	0,78 1991
C1	0,81 2016	0,83 2029	0,86 2037	0,87 2094	0,89 2072	0,9 2070	0,91 2062	0,92 2051
C2	0,75 2136	0,77 2154	0,79 2163	0,81 2197	0,83 2164	0,84 2159	0,85 2163	0,86 2148
C3	0,89 2061	0,92 2074	0,95 2091	0,97 2132	1,09 2109	1,1 2100	1,15 2090	1,18 2082
C4	0,93 2084	0,96 2095	0,99 2110	1,05 2133	1,17 2165	1,23 2167	1,27 2166	1,31 2161
C5	0,78 1991	0,8 2012	0,82 2019	0,83 2041	0,85 2028	0,86 2016	0,87 2000	0,88 1991

Как видно из табл. 8, для всех составов с увеличением времени твердения коэффициент размягчения возрастает, достигая значений через 180 суток от 0,8 до 1,31. При этом наибольший прирост (40,9 %) в возрасте 180 суток достигается для состава С4, а наименьший – для С5 (12,8 %). Полученные данные указывают на то, что мелкозернистые ГЦПВ-бетоны обладают хорошей водостойкостью. Средняя плотность также закономерно возрастает, и в большей степени с фракционированным песком. Наибольшие значения получены на составе С2, для которого плотность достигла 2148 кг/м³ через 180 сут.

Рост коэффициента размягчения и средней плотности бетона положительно отразился на его прочности на сжатие для всех составов С0-С5, что видно на рис. 5. При этом в наибольшей степени прочность возросла для состава С5, увеличившись за 180 суток в два раза относительно значения в суточном возрасте. Максимальное абсолютное

значение прочности на сжатие достигнуто для состава С4, которое через 180 суток составило 64,2 МПа.

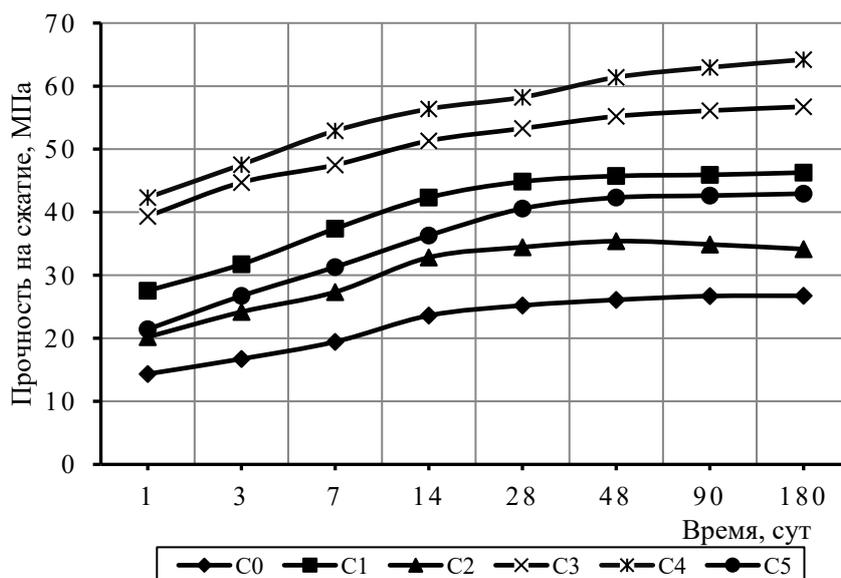


Рис.5. Кинетика твердения мелкозернистого ГЦПВ-бетона (иллюстрация авторов)
 Fig. 5. Kinetics of hardening of fine-grained GCPB concrete (illustration by the authors)

Установлено, что для ГЦПВ –бетона на мелком заполнителе с увеличением модуля крупности песка и снижения пустотности существенно возрастает его прочность (на 60%) при соотношении ГЦПВ:П = 1:1 и других равных условиях.

На рис. 6 представлена зависимость соотношения пределов прочности на растяжении при изгибе и сжатии мелкозернистых ГЦПВ-бетонов, которая описывается следующей формулой:

$$R_f = 0,26 \cdot R^{0,76} \tag{1}$$

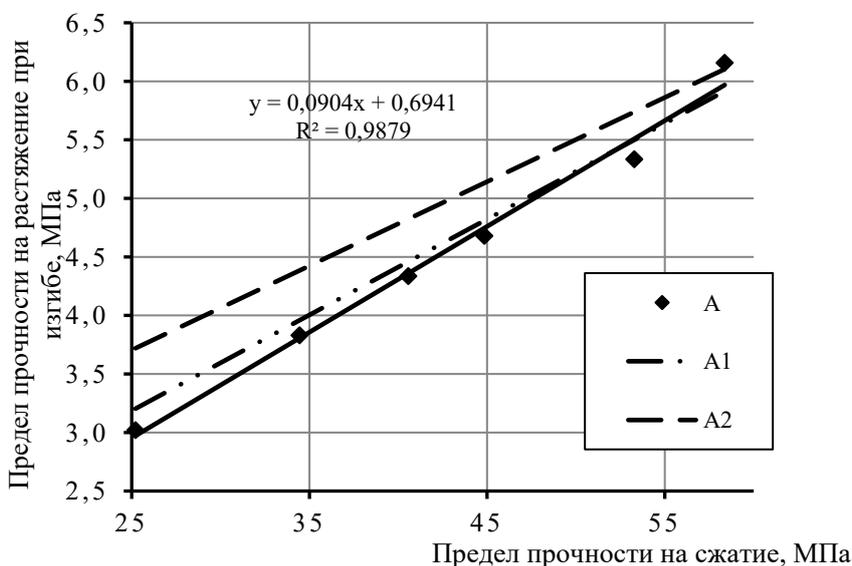


Рис.6. Сравнительные зависимости прочности на растяжение при изгибе R_f от прочности на сжатие R для мелкозернистых бетонов (иллюстрация авторов)
 A – экспериментальные данные авторов для ГЦПВ-бетонов, A1 – по формуле $R_f = 0,29 \cdot R^{0,74}$ [22]; A2 – по формуле $R_f = 1,82 \cdot R_t = 1,82 \cdot 0,29 \cdot R^{0,6}$ [23].

Fig.6. Comparative dependences of tensile strength in bending R_f on compressive strength R for fine-grained concrete (illustration by the authors)
 A – experimental data of the authors for GCPB concrete, A1 – according to the formula $R_f = 0.29 \cdot R^{0.74}$ [22]; A2 – according to the formula $R_f = 1.82 \cdot R_t = 1.82 \cdot 0.29 \cdot R^{0.6}$ [23].

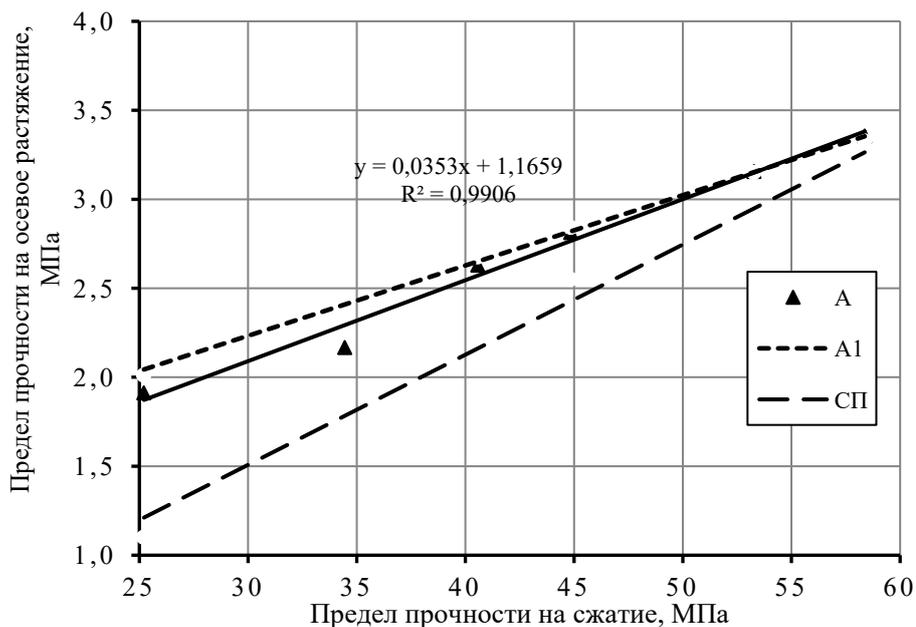


Рис. 7. Сравнительные зависимости прочности на осевое растяжение R_t от прочности сжатие R для мелкозернистых бетонов (иллюстрация авторов)
 А – экспериментальные данные авторов для ГЦПВ-бетонов, А1 – по формуле $R_t=0,29 \cdot R^{0,74}$ [22]; СП – по табл. 6.7 СП 63.13330 для мелкозернистого бетона

Fig. 7. Comparative dependences of axial tensile strength R_t on compressive strength R for fine-grained concrete (illustration by the authors)

A – experimental data of the authors for GCPB concrete, A1 – according to the formula $R_t=0.29 \cdot R^{0.74}$ [22]; SP – according to Table 6.7 of SP 63.13330 for fine-grained concrete

Установлено, что по характеру изменения эта зависимость практически идентична классическим зависимостям для бетонов на портландцементе [22, 23]. Это позволяет утверждать, что высокий расход ГЦПВ с химическими добавками не должен оказывать негативного влияния на трещиностойкость бетона. При этом наибольшее повышение прочности на растяжение при изгибе закономерно достигается для образцов с базальтовой фиброй. Из представленных данных следует, что отношение пределов прочности на сжатие и растяжение при изгибе мелкозернистых ГЦПВ-бетонов является инвариантным к возрасту бетона и определяется линейной зависимостью.

Аналогичным образом установлена зависимость соотношения пределов прочности на сжатие и осевое растяжение ГЦПВ-бетонов (рис. 7) и показано, что оно является инвариантным к возрасту бетона и описывается следующей формулой:

$$R_t=0,22 \cdot R^{0,67} \quad (2)$$

На следующем этапе работы были изучены силовые деформации, возникающие в ГЦПВ-бетоне при действии на него осевой сжимающей нагрузки. Испытания проводили путем нагружения ступенями нескольких серий образцов-цилиндров, часть из которых доводили до разрушения для определения их прочности на сжатие, а часть – до уровня 30 % от этой максимальной разрушающей нагрузки. На рис. 8 представлена зависимость напряжений от продольных деформаций ГЦПВ-бетонов для различных классов по прочности на сжатие от В20 до В45.

Как следует из рис. 8, напряжения с увеличением деформаций, возникающих в процессе нагружения бетона, возрастают практически линейно. При этом установлено, что микротрещины развиваются параллельно направлению действия нагрузки при относительно высоких её значениях. Наименее жестким закономерно оказался бетон класса по прочности на сжатие В20.

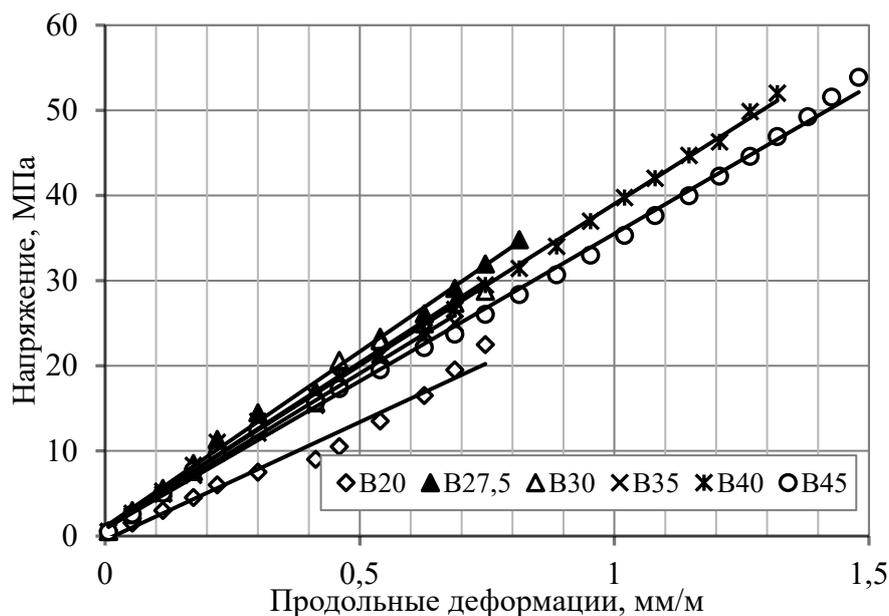


Рис.8. Зависимость напряжения от продольных деформаций ГЦПВ-бетона различных классов по прочности (иллюстрация авторов)

Fig. 8. Dependence of stress on longitudinal deformations of GCPB concrete of different strength classes (illustration by the authors)

С учетом полученных данных рассчитан коэффициент Пуассона, соответствующий значению, в котором устанавливается модуль упругости, а также определены кубиковая и цилиндрическая прочности. Результаты представлены в табл. 9.

Таблица 9

Прочностные и деформационные свойства мелкозернистого ГЦПВ-бетона

Условное обозначение составов	Класс ГЦПВ-бетона	Кубиковая прочность на сжатие, МПа	Цилиндрическая прочность на сжатие, МПа	Модуль упругости при 30 % от разрушающей нагрузки, ГПа	Модуль упругости цементного бетона по СП 63.13330, ГПа	Коэффициент Пуассона μ	$R_{ц}/R_{куб}$
C0	B20	25,2	21,7	18,9	19,5	0,241	0,86
C1	B35	44,9	40,4	26,2	27,5	0,193	0,90
C2	B27,5	34,5	29,7	22,4	24	0,233	0,86
C3	B40	53,3	48,9	27,5	28,5	0,172	0,91
C4	B45	58,4	52,5	28,2	-	0,164	0,90
C5	B30	40,6	34,8	24,0	26	0,20	0,86

Из данных рис. 8 и табл. 9 следует, что разработанные составы ГЦПВ-бетона в 28-суточном возрасте имеют следующие прочностные и деформативные свойства: прочность на сжатие 25,2-61,4 МПа для классов по прочности на сжатие B20 и B45, цилиндрическая прочность 22,7-55,5 МПа, начальный коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) находится в интервале значений 0,16-0,241, при 30% от разрушающей нагрузки значения модуля упругости варьируются в интервале 19-27,5 ГПа.

Далее было выполнено сравнение классов мелкозернистого бетона и модуля упругости, приготовленного на разных вяжущих: ГЦПВ и портландцементе. Результаты приведены на рис. 9.

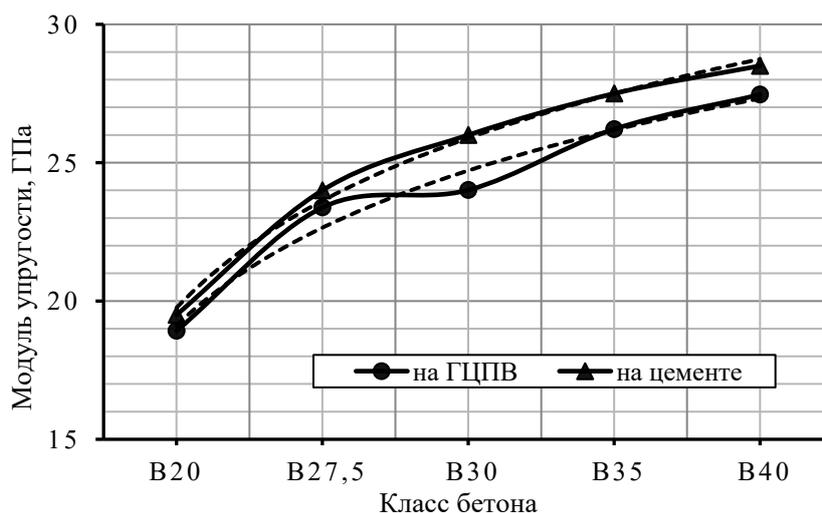


Рис. 9. Сравнительная зависимость классов бетона и модуля упругости на ГЦПВ и портландцементе (иллюстрация авторов)
 Fig. 9. Comparative dependence of concrete classes and elastic modulus on GCPB and Portland cement (illustration by the authors)

Из представленных на рис. 9 зависимостей следует, что модуль упругости мелкозернистых ГЦПВ-бетонов на 2,5-6,5 % ниже регламентированных значений для бетона на цементном вяжущем по СП 63.13330.2018, что обусловлено, во-первых, высокой концентрацией ГЦПВ (соотношение ГЦПВ:песок=1:1) и, во-вторых, влиянием комплексных химических добавок. При этом сам характер зависимости модуля упругости мелкозернистого ГЦПВ-бетона отличается от значений в СП 63.13330, поскольку наблюдается тенденция к росту начального модуля упругости с повышением предела прочности бетона.

На основе полученных экспериментальных данных было установлено сравнительное соотношение между прочностями на сжатие разных классов ГЦПВ-бетона, полученными путем испытания образцов-цилиндров и образцов-кубов. Зависимость показана на рис. 10. При этом она описывается следующими формулами:

$$\text{для классов B20-B30} \quad R_{\text{ц}} = 0,86 R_{\text{куб}} \quad (3)$$

$$\text{для классов B35-B45} \quad R_{\text{ц}} = 0,90 R_{\text{куб}} \quad (4)$$

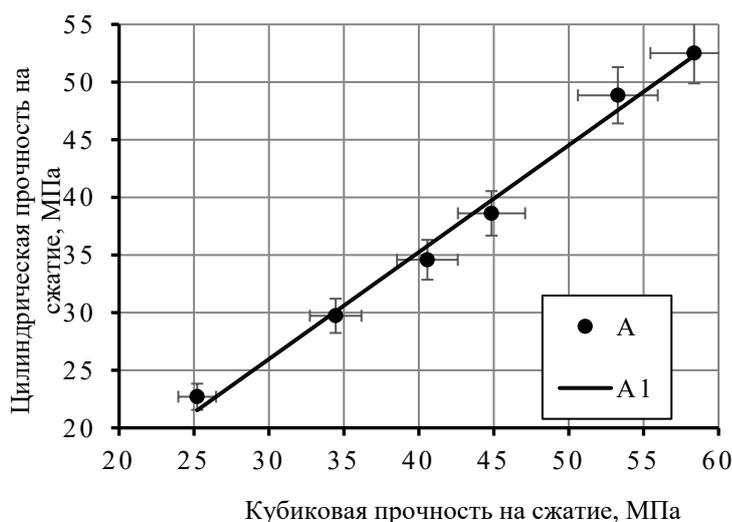


Рис.10. Взаимосвязь между цилиндрической и кубиковой прочностями на сжатие (иллюстрация авторов)

A – экспериментальные данные автора, A1 – по формуле $R_{\text{ц}}=0,88 R_{\text{куб}}$ [24]

Fig. 10. The relationship between cylindrical and cubic compressive strengths (illustration by the authors)

A – experimental data of the author, A1 – according to the formula $R_{\text{ц}}=0.88 R_{\text{куб}}$ [24]

На следующем этапе работы была определена взаимосвязь между модулем упругости и цилиндрической прочностью, которая представлена на рис. 11. Как видно, с увеличением прочности модуль упругости закономерно возрастает. При этом сама зависимость имеет практически линейный вид, которая описывается следующей формулой $y = 0,2058x + 17,284$, ($R^2 = 0,665$).

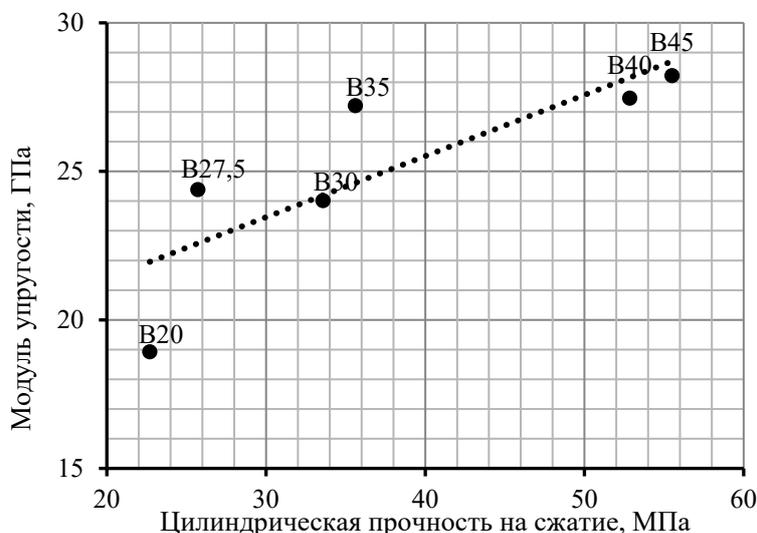


Рис.11. Взаимосвязь между цилиндрической прочностью и модулем упругости (иллюстрация авторов)

Fig.11. Relationship between cylindrical strength and elastic modulus (illustration by the authors)

По результатам проведенных исследований можно заключить, что по прочностным и деформативным характеристикам мелкозернистый бетон на основе ГЦПВ незначительно уступает аналогичным бетонам на основе портландцемента, что позволяет его рекомендовать для производства изделий и конструкций, применяющихся в несущих каркасах зданий.

4. Заключение

По результатам проведенных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Показано, что механические свойства мелкозернистого ГЦПВ-бетона значительно улучшены за счет оптимального гранулометрического состава мелкого заполнителя, армирования базальтовым волокном и совместного применения химических добавок (суперпластификатора, гидрофильной кристаллической добавки). Это позволило добиться повышенных прочностных показателей: при сжатии от 25 до 60 МПа, на растяжение при изгибе от 3,0 до 6,2 МПа, на осевое растяжение от 1,9 до 3,4 МПа. В результате получены составы мелкозернистого бетона на основе ГЦПВ с классами по прочности от В20 до В45. Они обладают повышенной водостойкостью ($K_p \geq 0,8$), характеризующиеся коэффициентом размягчения в интервале от 0,75 до 1,17. Все это позволило отнести их к долговечным бетонам, которые способны в конструкции воспринимать большие нагрузки и сохранять свои свойства при эксплуатации.

2. По полученным деформативным свойствам ГЦПВ-бетона на основе местного мелкого заполнителя обеспечивается возможность их применения в конструкциях и изделиях с влажным и мокрым режимами эксплуатации для малоэтажного строительства в Республике Йемен. Для мелкозернистого бетона на основе ГЦПВ с классами по прочности на сжатие В20-В45 значения модуля упругости варьировались от 18,9 до 28,2 ГПа, а коэффициента Пуассона - от 0,16 до 0,24.

3. Расчетное соотношение пределов прочности на сжатие и осевое растяжение (R_c) бетонов на ГЦПВ является инвариантным к его возрасту и описывается зависимостью $R_t = 0,22 \cdot R_c^{0,67}$. Показано, что это соотношение до 15 % превышает нормативные, установленные для цементного бетона в СП 63.13330.2018.

4. В сравнении с нормируемыми показателями модуля упругости по СП 63.13330.2018 для цементного бетона сопоставимых классов по прочности на сжатие

В20-В40 модуль упругости мелкозернистых ГЦПВ-бетонов оказался ниже, однако, отличие является незначительным (на 2,5-6,5 %).

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что мелкозернистые ГЦПВ-бетоны незначительно уступают аналогичным классам бетоном на основе портландцемента, что при соответствующем обосновании позволяет их рекомендовать для производства изделий и конструкций, применяющихся в несущих каркасах зданий.

Список литературы / References

1. Курбатов Ю.Е., Кашеварова Г.Г. Определение упругих характеристик цементного камня для прогнозирования усталостной долговечности бетона // Вестник МГСУ, 2022, Т. 17, №4. - С. 476–486. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.476-486.
Kurbatov Yu.E., Kashevarova G.G. Determination of elastic characteristics of cement stone to predict the fatigue life of concrete // MGSU Bulletin, 2022, Vol. 17, No.4. - P. 476-486. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.476-486.
2. Батыновский Э.И., Гуриненко Н.С., Корсун А.М. Структура, непроницаемость и долговечность цементного бетона // Наука и техника, 2022, Т. 21, №1. - С. 19–27. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27>.
Batyanskiy E.I., Gurinenko N.S., Korsun A.M. Structure, Impermeability and Durability of Cement Concrete. // Science and Technology. 2022, Vol. 21, No.1. - P. 19–27. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27>.
3. Frigione M.- Et. Al. Assessment of the Ageing and Durability of Polymers // Polymers. 2022, Issue 14. - P. 1934. DOI: 10.3390/polym14101934
4. Лесовик Р.В., Топчиев А.И., Агеева М.С. Пути повышения эффективности мелкозернистого бетона // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI в. 2007, № 7. - С. 16-18.
Lesovik R.V., Topchiev A.I., Ageeva M.S. Ways to improve the efficiency of fine-grained concrete // Construction materials, equipment and technologies of the 21st century. 2007, No. 7. - P. 16-18.
5. Белых С.А., Буянова Э.Э., Черниговская М.Н. Изучение влияния состава бурых углей на фазовый состав гидратированного цементного камня с золой-уноса // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2011, Т. 2. - С. 185-193.
Belykh S.A., Buyanova E.E., Chernigovskaya M.N. Study of the influence of brown coal composition on the phase composition of hydrated cement stone with fly ash // Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences. 2011, Vol. 2. - P. 185-193.
6. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник для вузов. – М.: АСВ, 2003. - 500 с.
Bazhenov Y.M. Concrete technology: textbook for universities. – М.: АСВ, 2003. - 500 p.
7. Vakhshouri B., and Nejadi S. Empirical Models and Design Codes in Prediction of Modulus of Elasticity of Concrete // Frontiers of Structural and Civil Engineering. 2019, Vol. 13. - P. 38-48.
8. Singh B.P., Yazdani N., and Ramirez. Effect of Time-dependent Concrete Modulus of Elasticity on Prestress Losses in Bridge Girders // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2013, Vol. 7. - P. 183-191.
9. Sengul O.; Sengul C.; Keskin G.; Akkaya Y.; Tasdemir C.; Tasdemir M.A. Fracture and microstructural studies on normal and high strength concretes with different types of aggregates // In Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. 2013, Toledo, Spain, 10–14 March 2013. - P. 714–725.
10. Narayanan S. Elastic Modulus of Concrete. 2021, Vol. 34. Available online:https://www.researchgate.net/publication/352863356_Elastic_Modulus_of_Concrete (reference date: 1.11.2024).
11. Ферронская А.В. Долговечность гипсовых материалов, изделий и конструкций. – М.: Стройиздат, 1984. - 256 с.

- Ferronskaya A.V. Durability of gypsum materials, products and structures. – М.: Stroyizdat, 1984. - 256 p.
12. Шейкин А. Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня.– М.: Стройиздат, 1974. – 192 с.
Sheikin A. E. Structure, strength and crack resistance of cement stone. – М.: Stroyizdat, 1974. - 192 p.
13. Чернышева Н.В. Водостойкие гипсовые композиционные материалы с применением техногенного сырья. Дисс... канд. техн. наук. – Белгород, 2014. - 434 с.
Chernysheva N.V. Waterproof gypsum composite materials using technogenic raw materials. Diss... cand. tech. sciences. – Belgorod, 2014. - 434 p.
14. Ферронская А.В., Рожкова К.Н., Волженский А.В. Влияние структуры гипсоцементно-пуццоланового камня на его деформативные свойства. // Строительные материалы. 1973, №1. - С. 30-31.
Ferronskaya A.V., Rozhkova K.N., Volzhensky A.V. Influence of the structure of gypsum-cement-pozzolan stone on its deformation properties // Construction materials. 1973, No.1. - P. 30-31.
15. Ферронская А.В., Коровяков В.Ф., Баранов И.М., Бурьянов А.Ф., Лосев Ю.Г., Поплавский В.В., Шишин А.В. Гипс в малоэтажном строительстве. – М.: АСВ, 2008. – 240 с.
Ferronskaya A.V., Korovyakov V.F., Baranov I.M., Buryanov A.F., Losev Yu.G., Poplavsky V.V., Shishin A.V. Gypsum in low-rise construction. – М.: АСВ, 2008. - 240 p.
16. Сагдатуллин Д.Г., Морозова Н.Н., Хозин В.Г., Власов В.В. Высокопрочное гипсоцементноцеолитовое вяжущее // Строительные материалы. 2010. № 2. - С. 53-55.
Sagdatullin D.G., Morozova N.N., Khozin V.G., Vlasov V.V. High-strength gypsum-cement-zeolite binder // Construction materials. 2010, No.2. - P. 53-55.
17. Халиуллин М.И., Нуриев М.И., Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р. Влияние пластифицирующих добавок на свойства гипсоцементнопуццоланового вяжущего // Вестник Казанского технологического университета. 2015, Т. 18, № 6. - С. 119-122.
Khaliullin M.I., Nuriev M.I., Rakhimov R.Z., Gaifullin A.R. The influence of plasticizing additives on the properties of gypsum-cement-pozzolan binder // Bulletin of Kazan Technological University. 2015, Vol. 18, No.6. - P. 119-122.
18. Галаутдинов А.Р., Мухаметрахимов Р.Х. Полифункциональный химический модификатор гипсоцементных композиций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018, № 11 (74). - С. 17 – 25. doi: 10.18720/CUBS.74.3.
Galautdinov A.R., Mukhametrahimov R.Kh. Polyfunctional chemical modifier of gypsum-cement compositions // Construction of unique buildings and structures. 2018, No.11. - P. 17 – 25. DOI: 10.18720/CUBS.74.3.
19. Хамза Абдулмалек Кайс, Морозова Н.Н. Влияние пластифицирующих добавок на свойства комплексного гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (Опыт Республики Йемен)// Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 8 (788). - С. 57–70. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-57-70.
Hamza Abdulmalek Qais, Morozova N.N. Influence of plastifying additives on the properties of complex gypsum-cement-pozzolan binder (experience of the Republic of Yemen). News of Higher Educational Institutions. Construction. 2024. No.8 (788) - P. 57–70. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-57-70.
20. Кайс Х.А., Богданов Р.Р., Морозова Н.Н., Мавлюбердинов А.Р., Сулейманова Л.А. Влияние суперпластифицирующих добавок на основе эфира поликарбоната на технологические и физико-механические свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. №8. - С. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-20-28.

- Qais H.A., Bogdanov R.R., Morozova N.N., Mavlyuberdinov A.R., Suleymanova L.A. The effect of superplasticizing additives based on polycarboxylate ether on the technological and physical and mechanical properties of gypsum-cement-pozzolan binder // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2024. No.8. P. 20-28. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-20-28.
21. Кайс Х.А., Морозова Н.Н., Хохряков О.В. Сравнительная эффективность добавок гидрофобизирующего и кристаллизационного действия на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего и бетона на его основе // Строительные материалы. 2024. № 11. С. 63–72. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-830-11-63-72>.
- Qais H.A., Morozova N.N., Khokhryakov O.V. Comparative efficiency of additives with hydrophobizing and crystallization action on the properties of gypsum-cement-pozzolan binder and concrete based on it // Construction materials. 2024. No. 11. - P. 63–72. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-830-11-63-72>.
22. Несветаев Г.В., Кардумян Г.С. О применении цементных бетонов для дорожных и аэродромных покрытий // Строительные материалы. 2014, №3. - С. 31 – 35.
- Nesvetaev G.V., Kardumyan G.S. On the use of cement concrete for road and airfield pavements // Construction materials. 2014, No.3. - P. 31 - 35.
23. Несветаев Г.В. Бетоны: учебное пособие для вузов. – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – 381 с.
- Nesvetaev, G.V. Concrete: a textbook for universities. - Rostov on/D: Fenix, 2013. – 381 p.
24. Mane Bajirao & Patil Ajit. An experimental study of the relationship between modulus of elasticity, Poisson's ratio, and the mechanical properties of high-performance concrete // Discover Civil Engineering. 2024, Vol. 1 No. 4. <https://DOI.ORG/10.1007/s44290-024-00003-z>

Информация об авторах

Кайс Хамза Абдулмалек, исследователь, Университет Саны, г. Сана, Республика Йемен
Email: hamza.qais@mail.ru, ORCID: 0009-0000-2805-7760

Морозова Нина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: ninamor@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7867-4203

Хохряков Олег Викторович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: olvik@list.ru, ORCID: 0000-0001-5337-2850

Низамов Рашит Курбангалиевич, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Академик Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: Nizamov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-3448-7369

Information about the authors

Hamza A. Qais, Researcher, Sana'a University, Sana'a, Republic of Yemen

Email: hamza.qais@mail.ru, ORCID: 0009-0000-2805-7760

Nina N. Morozova, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: ninamor@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7867-4203

Oleg V. Khokhryakov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: olvik@list.ru, ORCID: 0000-0001-5337-2850

Rashit K. Nizamov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

E-mail: Nizamov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-3448-7369