

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.545-558

Гидрофизические и механические свойства мелкозернистого бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего

Хамза Абдулмалек Кайс¹, Нина Николаевна Морозова²

¹ Университет Саны; г. Сана, Йеменская Республика;

² Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Наиболее важными показателями мелкозернистого бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего, позволяющими расширить возможности его применения в несущих строительных конструкциях зданий, являются прочностные и гидрофизические свойства. Особенно это актуально для конструкций, которые эксплуатируются в условиях жаркого тропического климата Йеменской Республики 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.

Материалы и методы. Для приготовления гипсоцементно-пуццоланового вяжущего использовали гипсовое вяжущее марки Г-5 и цементное вяжущее марки ЦЕМ I 42,5Н, а также два вида пуццолановых добавок: природный цеолит и микрокремнезем. В качестве волокнистого материала применяли базальтовую фибру, в качестве химических модификаторов — суперпластификатор марки Master Glenium 112 и гидрофобизатор кристаллизационного действия марки Flocrete WP Crystal. Для приготовления гипсоцементно-пуццоланового бетона в качестве мелкого заполнителя использовали нефракционированный природный кварцевый песок и два вида песка, рассеянного по фракциям. Методом глубокого проникновения воды под давлением исследована водопроницаемость гипсоцементно-пуццоланового бетона. Подвижность определяли по диаметру расплыва гипсоцементно-пуццолановой смеси по ГОСТ 23789–2018 с использованием прибора Суттарда; прочность на сжатие оценивали после 28 суток твердения в соответствии с ГОСТ 10180–2012; водопоглощение — по методике ГОСТ 23789–2018; водостойкость оценивали по коэффициенту размягчения.

Результаты. В результате проведенных экспериментов получен оптимальный состав гипсоцементно-пуццоланового бетона с высокими прочностными и гидрофизическими свойствами за счет оптимального гранулометрического состава мелкого заполнителя, армирования фибровым волокном и применения различных комплексных химических добавок.

Выводы. Получены следующие показатели: прочность при сжатии 60 МПа, водопоглощение 2,8 %, коэффициент размягчения 1,17, водонепроницаемость W10.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, водопоглощение, подвижность, прочность, водостойкость, водонепроницаемость, глубина проникновения воды

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кайс Х.А., Морозова Н.Н. Гидрофизические и механические свойства мелкозернистого бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 545–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.545-558

Автор, ответственный за переписку: Хамза Абдулмалек Кайс, hamza.qais@mail.ru.

Hydrophysical and mechanical properties of fine-grained concrete based on gypsum cement pozzolanic binder

Hamza A. Qais¹, Nina N. Morozova²

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

² Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The most important indicators of fine-grained concrete based on gypsum cement pozzolanic binder, allowing to expand the possibilities of its application in load-bearing building structures, are strength and hydrophysical properties. This is especially relevant for structures that are used 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 pozzolanic concrete to withstand the effects of moisture penetrating into the “body” of concrete together with aggressive substances from the environment will obviously lead to the loss of its original properties.

Materials and methods. To prepare the gypsum cement pozzolanic binder, we used gypsum binder grade G-5 and cement binder grade CEM I 42.5N, as well as two types of pozzolanic additives: natural zeolite and microsilica. Basalt fibre was used as a fibrous material. Superplating agent grade Master Glenium 112 and crystallization water repellent grade Flocrete WP Crystal were used as chemical modifiers. To prepare the gypsum cement pozzolanic concrete, unfractionated natural

quartz sand and two types of sand dispersed by fractions were used as fine aggregate. The water permeability of gypsum cement pozzolanic concrete was studied using the method of water penetration depth under pressure. The mobility was determined by the diameter of the gypsum-cement-pozzolanic mixture flow — according to GOST 23789–2018 using the Suttard device; compressive strength was assessed after 28 days of hardening in accordance with GOST 10180–2012; water absorption — according to the method of GOST 23789–2018; water resistance was assessed by the softening coefficient.

Results. As a result of the experiments, an optimal composition of gypsum-cement-pozzolanic concrete with high strength and hydrophysical properties was obtained due to the optimal granulometric composition of fine aggregate, reinforcement with fibre and the use of various complex chemical additives.

Conclusions. The study yielded the following results: compressive strength 60 MPa, water absorption 2.8 %, softening coefficient 1.17, water resistance W_{10} .

KEYWORDS: gypsum-cement-pozzolanic binders, water absorption, mobility, strength, water resistance, water impermeability, water penetration depth

FOR CITATION: Qais H.A., Morozova N.N. Hydrophysical and mechanical properties of fine-grained concrete based on gypsum cement pozzolanic binder. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):545-558. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.545-558 (rus.).

Corresponding author: Hamza A. Qais, hamza.qais@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Важный показатель всех строительных материалов — их долговечность [1–6], которая выражается в сохранении как физико-механических свойств, так и эстетичного внешнего вида, что для конечного потребителя зачастую становится главным фактором при выборе изделий. Долговечность бетона определяется степенью проницаемости агрессивных флюидов и газов [7]. На практике оценка проницаемости бетона осуществляется в основном по мере его водонепроницаемости. Это объясняется простотой и удобством данного флюида. Кроме того, водонепроницаемость определяет другие гидрофизические свойства бетона, такие как морозостойкость и водостойкость.

Бетоны на основе гипсоцементно-пуццолановых вяжущих (ГЦПВ) в сравнении с цементными имеют относительно короткий срок службы. Одной из причин разрушения бетона железобетонных конструкций на основе ГЦПВ служит высокое значение его открытой капиллярной пористости и, как следствие, существенное водопоглощение. Влага, проникая вглубь бетона, ослабляет однородную структуру конструкций, способствует образованию раковин, трещин, а впоследствии вызывает разрушение и сооружений. В дополнение к этому при замерзании в структуре бетона вода при переходе в лед увеличивается в объеме и разрушает бетон, что приводит к снижению его долговечности [8, 9].

Как известно, ключевыми свойствами, определяющими долговечность ГЦПВ-бетонов, являются водонепроницаемость и водостойкость [10–12], для улучшения которых применяют различные материалы, например минеральные наполнители с высоким пуццолановым эффектом [13–15], пластифицирующие добавки [16–19], специальные добавки: гидрофобизирующие [20] и гидрофильные добавки кристаллизационного действия [21], микроармирование различными видами фибр минерального или органического происхождения [22–24] и др.

Одно из направлений совершенствования технологии цементного бетона — его микроармирование

волокнами различного вида, так называемой фиброй. Фиброармирование бетона повышает показатель его водонепроницаемости [25, 26], а совместно с комплексными добавками увеличивается прочность и водостойкость, тем самым растет сопротивляемость проникновению воды.

Для повышения водонепроницаемости бетона, кроме специальных и комплексных добавок, могут быть использованы плотные заполнители [27]. Приготовление бетонов на фракционированных заполнителях способствует созданию более плотной структуры и высокой прочности, вместе с этим повышается его водонепроницаемость.

Поскольку на водонепроницаемость цементного бетона влияют многие факторы, а именно водоцементное (В/Ц) отношение [28, 29], структура порового пространства [30], вид, размер зерен заполнителей и их количество [31, 32], то они могут отразиться и в бетоне на основе ГЦПВ.

Следует отметить, что испытание ГЦПВ-бетона на водонепроницаемость в тематической литературе не описывается, по сути, авторы в своих публикациях [8, 10, 11, 14, 18–20] не ставили и не решали такую задачу. Для подобных материалов в настоящее время существует несколько методов ее измерения [33]. Среди них можно выделить следующие четыре: метод «мокрого пятна», коэффициент фильтрации, глубина проникновения воды, воздухопроницаемость. Кроме этих, применяют и другие прямые и косвенные методы испытания бетона на водонепроницаемость [34–36], а также методы, приведенные в патентах РФ на изобретения [37, 38]. В Европе широко используется метод оценки водонепроницаемости бетона по глубине проникновения воды под давлением [39–41], который описан в EN 12390-8:2019 «Испытание затвердевшего бетона. Часть 8: Глубина проникновения воды под давлением». В Америке, например, действует стандарт ASTM C1585-20 «Стандартный метод испытаний для измерения скорости поглощения воды гидроцементными бетонами» и отсутствует прямой метод определения их водонепроницаемости. Рассмотренные методики оценки

водонепроницаемости касаются бетонов на гидравлических вяжущих, тогда как ГЦПВ в большей своей части состоит из гипсового вяжущего, относящегося к воздушным вяжущим веществам. Сегодня в литературе отсутствует информация по установленному методу испытания ГЦПВ-бетона по этому показателю. Поэтому в настоящем исследовании водопроницаемость ГЦПВ-бетона оценивали по EN 12390-8:2019 «Испытание затвердевшего бетона. Часть 8: Глубина проникновения воды под давлением», который для Йеменской Республики является основным.

Однако экспериментальных работ по установлению значений водонепроницаемости ГЦПВ-бетонов нет, отсутствуют и данные о корреляции с водопоглощением и коэффициентом размягчения, которые служат единственными и признанными показателями оценки стойкости ГЦПВ к увлажнению.

Цель настоящего исследования — сравнительный анализ влияния состава ГЦПВ-бетонов различных классов по прочности на их гидрофизические показатели. При этом решаются следующие задачи: определение прочности при сжатии и построение кинетических кривых твердения ГЦПВ-бетона с различным количеством мелкого заполнителя и вида модификаторов; определение водопоглощения и водостойкости ГЦПВ-бетонов различных составов; определение влияния прочности ГЦПВ-бетонов на их гидрофизические показатели; установление и анализ зависимости водопоглощения, глубины проникновения воды под давлением от прочности, а также взаимосвязь водопоглощения ГЦПВ-бетонов различных классов по прочности с глубиной проникновения воды под давлением.

Предмет исследования — определение гидрофизических и механических свойств мелкозернистого бетона, изготовленных на основе ГЦПВ.

Объект исследования — модифицированный мелкозернистый бетон на основе ГЦПВ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для приготовления ГЦПВ использовали гипсовое и цементное вяжущие, а также два вида пудцолановых добавок (АМД): природный цеолит и микрокремнезем. В качестве гипсового использовали вяжущее (ГВ) марки Г-5, производимое ООО Develop a nation (Йеменская Республика) по EN 13279-1:2008. В качестве цементного вяжущего применяли портландцемент (ПЦ) марки ЦЕМ I 42,5Н Amran cement (Йеменская Республика), удовлетворяющий ASTM C 150 – TYPE 1, его паспортный минералогический состав представлен в табл. 1, химический состав — в табл. 2.

Природный цеолит (ЦЕО) в виде мелкозернистого материала светло-зеленого цвета с наибольшим размером зерен 1 мм перед применением в составе ГЦПВ высушивали до постоянной массы и измельчали до порошкообразного состояния с удельной поверхностью 6500 см²/г. ЦЕО получен с предприятия Yemen zeolite в г. Сана (Йеменская Республика). Его пудцолановая активность по поглощению СаО из насыщенного известкового раствора составила 815 мг/г.

Микрокремнезем (МК) взят с Саудовского металлургического комбината BUILMIX. Он представляет собой дисперсный продукт с частицами сферической формы размером 0,01–0,1 мкм, характеризующийся удельной поверхностью 38 000 см²/г и пудцолановой активностью 1210 мг/г. Химические составы ЦЕО и МК приведены в табл. 2.

Базовый состав ГЦПВ, определенный в работе [15], следующий: Г:ПЦ:МК:ЦЕО = 60:25:10:5 % по массе.

В качестве волокнистого материала использовали базальтовую фибру (БАЗ) производства ООО Arab Basalt Fiber Company г. Фуджайра (Объединенные Арабские Эмираты), которая представляет собой отрезки базальтового непрерывного волокна, собранные во временные пучки (монофиламенты).

Табл. 1. Минералогический состав цемента

Table 1. Mineralogical composition of cement

Маркировка цемента Cement marking	Минеральный состав клинкера, % Mineral composition of clinker, %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Амран цемент (ЦЕМ I 42,5Н) Amran cement (CEM I 42.5H)	53,8	20,9	6,4	12,04

Табл. 2. Химический состав цемента и активных минеральных добавок

Table 2. Chemical compositions of cement and active mineral additives

Маркировка материала Material marking	Количество, % / Quantity, %									
	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	SO ₃
ПЦ / PC	20,59	63,35	2,94	3,77	–	4,96	–	–	–	1,96
ЦЕО / ZEO	71,3	0,89	0,43	3,44	0,99	11,12	2,69	0,22	0,02	–
МК / SF	53,8	5,7	2,3	5,2	0,6	26,72	0,7	1,4	–	–

Табл. 3. Показатели фракционированного состава песков
Table 3. Indicators of fractional composition of sands

Маркировка песка Sand marking	Содержание фракций, % / Content of fractions, %						Насыпная плотность, кг/м³ Bulk density, kg/m³	Пустотность, % Voidness, %	Модуль крупности Module of fineness
	>2,5 мм / mm	2,5–1,25 мм / mm	1,25–0,63 мм / mm	0,63–0,315 мм / mm	0,315–0,16 мм / mm	<0,16 мм / mm			
Нефракционированный / No frac.	23	26	27	10	13	1	1605	39,4	2,35
Фракционированный № 1 / Fr. No. 1	0	70	15	5	5	5	1665	36,4	3,4
Фракционированный № 2 / Fr. No. 2	0	55	10	10	20	5	1634	38,3	2,90

Разработанная комплексная добавка (КД) с оптимальной дозировкой 1,5 % от массы ГЦПВ, выбранная как наиболее эффективная из широкого спектра пластифицирующих добавок по проведенным ранее исследованиям [17], состояла из суперпластификатора марки Master Glenium 112 производства Master Builders Solutions MBCC-GROUP (Германия) и гидрофобизатора кристаллизационного действия марки Flocrete WP Crystal в количестве 2 % [21].

Для приготовления ГЦПВ-бетонов в качестве заполнителя использовали нефракционированный песок Дафирского месторождения (Йеменская Республика) и фракционированный — двух составов с наилучшими свойствами [42]. Характеристики песков представлены в табл. 3.



Рис. 1. Установка для испытания образцов бетона по глубине проникновения воды под давлением
Fig. 1. Installation for testing concrete specimens for the depth of water penetration under pressure

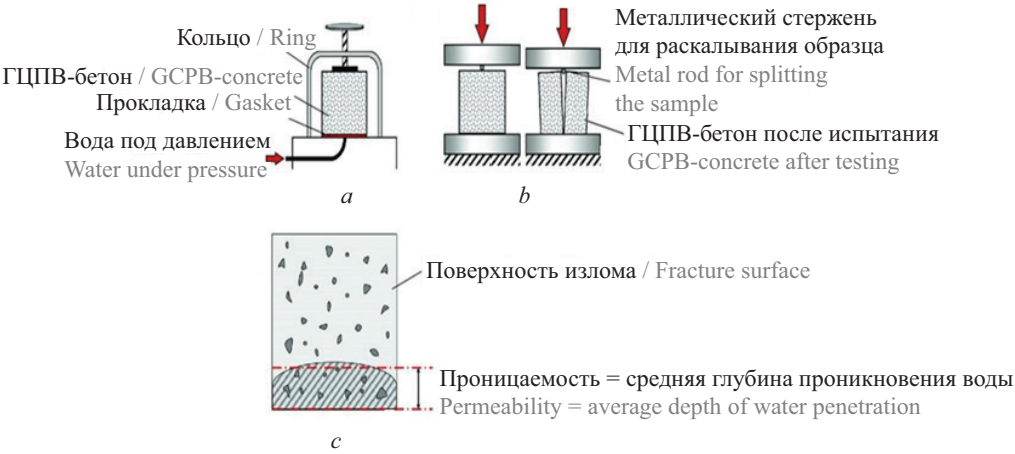


Рис. 2. Схема процесса испытания глубины проникновения воды под давлением в образцы ГЦПВ-бетона: *a* — образец ГЦПВ-бетона, контактирующий с водой под давлением в испытательной установке; *b* — способ раскалывания образца пополам для замера глубины проникновения воды; *c* — схема измерения в трех местах и определения среднего значения глубины мокрого пятна на поверхности разлома
Fig. 2. Scheme of the process of testing the depth of water penetration under pressure into specimens of GCPB concrete: *a* — GCPB concrete specimen in contact with water under pressure in a test setup; *b* — a method of splitting the specimen in half to measure the depth of water penetration; *c* — a diagram of measuring in three places and determining the average value of the depth of the wet spot on the fracture surface

Методы испытания

Используя стандартные методики, были определены:

- подвижность по диаметру расплыва ГЦПВ-смеси — по ГОСТ 23789–2018 с использованием прибора Суттарда;
- прочность на сжатие ГЦПВ-бетона оценивали после 28 сут твердения в соответствии с ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» на образцах-кубиках с размерами ребра 150 мм;
- водопоглощение ГЦПВ-бетона — по методике ГОСТ 23789–2018;
- водостойкость ГЦПВ-бетона оценивали по коэффициенту размягчения, который рассчитывали из отношения предела прочности на сжатие образцов в водонасыщенном состоянии (водонасыщение производили в течение 48 ч) к пределу прочности на сжатие образцов в сухом состоянии;
- водонепроницаемость бетона оценивали по глубине проникновения воды под давлением, которая описана в EN 12390-8:2019 «Испытание затвердевшего бетона. Часть 8: Глубина проникновения воды под давлением» и применяется в Европе [31–37], показатель водонепроницаемости оценивали на образцах-кубиках размером 150 × 150 × 150 мм, суть которого заключается в оценке глубины проникновения воды после 72-часового приложения давления 0,5 МПа. По истечении этого времени образцы раскалывали на две части, замеряли максимальную глубину проникновения воды в бетон с точностью до 1 мм, и по среднеарифметическому значению глубины проникновения воды трех образцов определяли класс водонепроницаемости бетона по таблице ГОСТ 12730.5–2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости». Все образцы до испытания хранили в камере нормального твердения в течение 28 сут и одни сутки в комнатных условиях. Испытание образцов на водонепроницаемость проводили на установке Form+Test WE 6 MMZ (Германия), представленной на рис. 1, по схеме, показанной на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первоначально установлено количество воды для составов ГЦПВ-бетонов с химическими добавками (Flocrete WP Crystal, Master Glenium 112) и базальтовой фиброй из условия получения равноподвижных смесей, которые по расплыву вискозиметра Суттарда имели диаметр 185 ± 5 мм. Составы бетонов, имеющих различное В/Ц отношение и ГЦПВ:П, приведены в табл. 4.

Изготовленные образцы из составов ГЦПВ-бетона твердели в нормально- влажностных условиях в течение 180 сут. В этот период времени были определены коэффициент размягчения, средняя плотность и прочность на сжатие. Результаты испытаний показаны в табл. 5 и на рис. 3.

Как видно из табл. 5, для всех составов с увеличением времени твердения коэффициент размягчения возрастает, достигая значений через 180 сут от 0,8 до 1,31. При этом наибольший прирост (40,9 %) от одних до 180 сут 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, особенно при использовании фракционированного песка. Наибольшие значения получены для состава С2, у которого плотность достигла 2148 кг/м³ через 180 сут.

Как видно из рис. 3, с течением времени наблюдается рост прочности на сжатие у всех исследованных составов. Наибольшей прочностью характеризуется состав С4 как в раннем возрасте, так и в 180-суточном возрасте твердения. К этому составу С4 близок по значению прочности и скорости ее набора состав С3. Авторы считают, что этому способствует комплексная добавка, а фибровое армирование в составе С4 позволяет повысить прочность на 9–12 % относительно состава С3. Все остальные составы ГЦПВ-бетона с монодобавкой имеют прочность на сжатие не более 40 МПа. Наименьшую прочность на сжатие во все исследованные сроки твердения показал состав С0 на нефракционирован-

Табл. 4. Составы мелкозернистого ГЦПВ-бетона
Table 4. Compositions of fine-grained GCPB concrete

Условное обозначение состава Conventional designation of composition	Номер песка по табл. 3 No. Sand according to Tbl. 3	В/Ц W/S	ГЦПВ:П GCPB:S	Вид и содержание химических добавок в % от массы ГЦПВ Type and content of chemical additives in % of the mass of the GCPB		БАЗ, % от массы бетона BAZ, % of concrete mass
				Flocrete WP Crystal	Master Glenium 112	
C0	№ 1	0,330	1:1	–	1,5	–
C1	№ 2	0,274	1:1	–	1,5	–
C2		0,290	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	–

Табл. 5. Кинетика плотности и коэффициента размягчения различных составов ГЦПВ-бетона

Table 5. Kinetics of density and softening coefficient of various compositions of GCPB concrete

Условное обозначение составов Conventional designation of compositions	Коэффициент размягчения и средняя плотность, кг/м³, в возрасте, сут Softening coefficient and average density, kg/m³, at age, days							
	1	3	7	14	28	48	90	180
C0	0,68	0,7	0,73	0,74	0,75	0,77	0,78	0,8
	1982	1989	1993	2005	1995	1997	1991	1985
C1	0,81	0,83	0,86	0,87	0,89	0,9	0,91	0,92
	2016	2029	2037	2094	2072	2070	2062	2051
C2	0,75	0,77	0,79	0,81	0,83	0,84	0,85	0,86
	2136	2154	2163	2197	2164	2159	2163	2148
C3	0,89	0,92	0,95	0,97	1,09	1,1	1,15	1,18
	2061	2074	2091	2132	2109	2100	2090	2082
C4	0,93	0,96	0,99	1,05	1,17	1,23	1,27	1,31
	2084	2095	2110	2133	2165	2167	2166	2161
C5	0,78	0,8	0,82	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88
	1991	2012	2019	2041	2028	2016	2000	1991

ном песке. Состав бетона C2, в котором количество заполнителя в два раза больше, чем в составе C0, характеризуется большими показателями прочности на сжатие на 35 % и меньшим В/Ц соотношением на 12 % благодаря фракционированию песка.

По результатам испытаний на сжатие определены классы ГЦПВ-бетона с учетом его показателей однородности (ГОСТ 18105), значения которых представлены в табл. 6. Гидрофизические свойства ГЦПВ-бетона разных марок по прочности оценивали по марке водонепроницаемости и водопоглощению (табл. 6).

Результаты испытаний бетонов показывают (табл. 6), что использование фракционированного песка состава № 1 (C2 по табл. 3) позволяет снизить водопоглощение бетона на 32 % в сравнении с контрольным составом (C0 по табл. 3), а применение фракционированного песка состава № 2 (C5 по табл. 3) — лишь на 23 %. Считаем, что факт снижения водопоглощения ГЦПВ-бетона с применением фракционированных песков обусловлен более плотной упаковкой его зерен и снижением пустотности [42, 43]. Наибольшим снижением значения водопоглощения испытанных составов ГЦПВ-бетона обладает состав

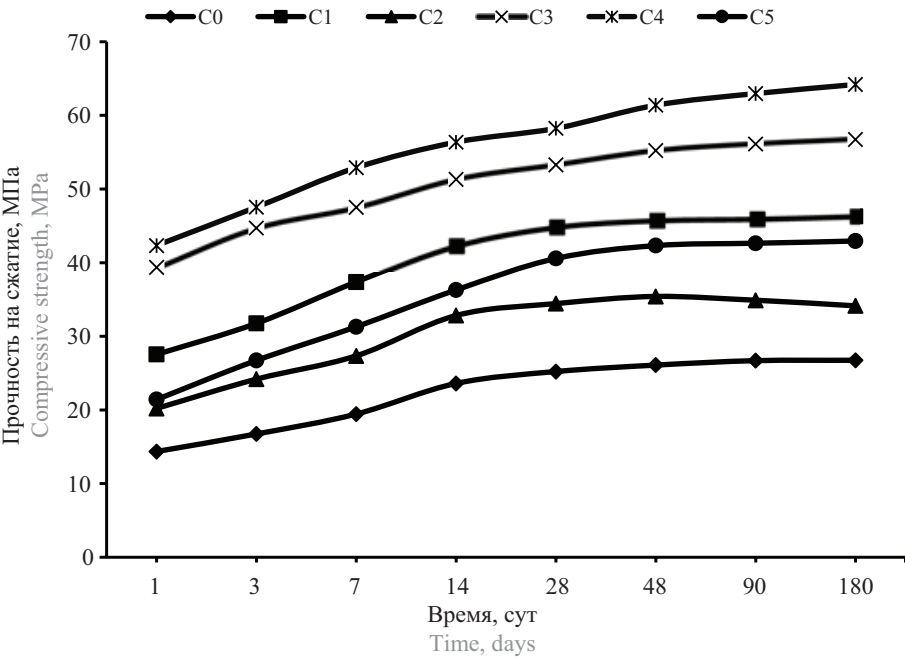


Рис. 3. Кинетика прочности на сжатие ГЦПВ-бетона

Fig. 3. Kinetics of compressive strength of GCPB concrete

Табл. 6. Механические и гидрофизические показатели ГЦПВ-бетонов

Table 6. Mechanical and hydrophysical properties of GCPB concrete

Шифр состава Composition code	Прочность бетона в партии R_m , МПа Concrete strength in a batch R_m , MPa	Среднеквадратическое отклонение S_m Standard deviation S_m	Текущий коэффициент вариации V_m , % Current coefficient of variation V_m , %	Фактический класс бетона по прочности B_f Actual concrete strength class B_f	Ближайший класс бетона по прочности The closest concrete strength class	Глубина проникновения воды в образец, мм Depth of water penetration into the specimen, mm	Марка по водонепроницаемости W (по [44]) Waterproof grade W (according to [44])	Водопоглощение, % Water absorption, %
C0	25,21	4,11	16,30	20,17	B20	145	2	10,62
C1	44,85	3,78	8,43	35,88	B35	109	6	7,18
C2	34,45	3,04	8,82	27,56	B27,5	130	2	10,45
C3	52,28	2,95	5,64	41,82	B40	84	8	3,21
C4	58,24	2,46	4,22	46,59	B45	75	10	2,77
C5	40,57	3,17	7,81	32,46	B30	125	4	8,15

C3 с классом по прочности B40. Применение добавки Flocrete WP Crystal кристаллизационного принципа действия в составе C3 позволило уменьшить водопоглощение до 3,2 % против 10,6 % для контрольного состава (C0). Снижение водопоглощения ГЦПВ-бетона с добавкой Flocrete WP Crystal обусловлено уплотнением его микроструктуры [21].

Фибровое армирование ГЦПВ бетона дало возможность не только повысить его прочность, но и снизить водопоглощение до значения 2,8 % (со-

став C4). Меньшее водопоглощение мелкозернистого ГЦПВ-бетона на фракционированном песке с базальтовой фиброй связываем с изменением порового пространства так, что вода проникает на незначительную глубину 2–3 мм [7]. Подтверждающим фактом снижения водопоглощения ГЦПВ-бетона являются и невысокие значения коэффициента размягчения бетона (табл. 5), так для контрольного состава оно составляет 0,75, в то же время для образцов с модифицирующими добавками — 0,83–1,17 в зависимо-

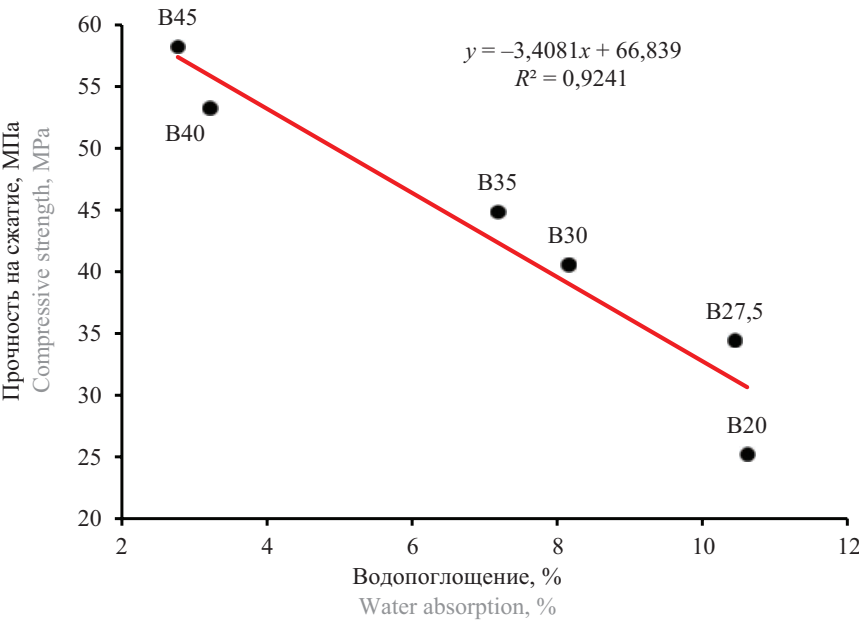


Рис. 4. Зависимость водопоглощения ГЦПВ-бетона от его прочности на сжатие

Fig. 4. Dependence of water absorption of GCPB concrete on its compressive strength

сти от вида модификаторов. Существенное влияние на водопоглощение оказывает фактическая прочность ГЦПВ-бетона (рис. 4).

Как видно из рис. 4, наименьшим водопоглощением характеризуются составы ГЦПВ-бетона с большей прочностью на сжатие, и эта зависимость имеет практически линейный характер.

Другими задачами работы было установление зависимостей между прочностью и глубиной проникновения воды под давлением (рис. 5) и между водопоглощением и глубиной проникновения воды

под давлением в зависимости от состава ГЦПВ-бетона (рис. 6).

Из данных рис. 5, 6 видно, что глубина проникновения воды и водопоглощение ГЦПВ-бетона уменьшаются с повышением прочности при сжатии.

Из рис. 6 видно, что водопоглощение и водонепроницаемость испытанных ГЦПВ-бетонов классов от В20 до В45 имеют линейную зависимость.

В результате выполненных исследований установлена зависимость между водопроницаемостью и водопоглощением для классов по прочности ГЦПВ-бетона

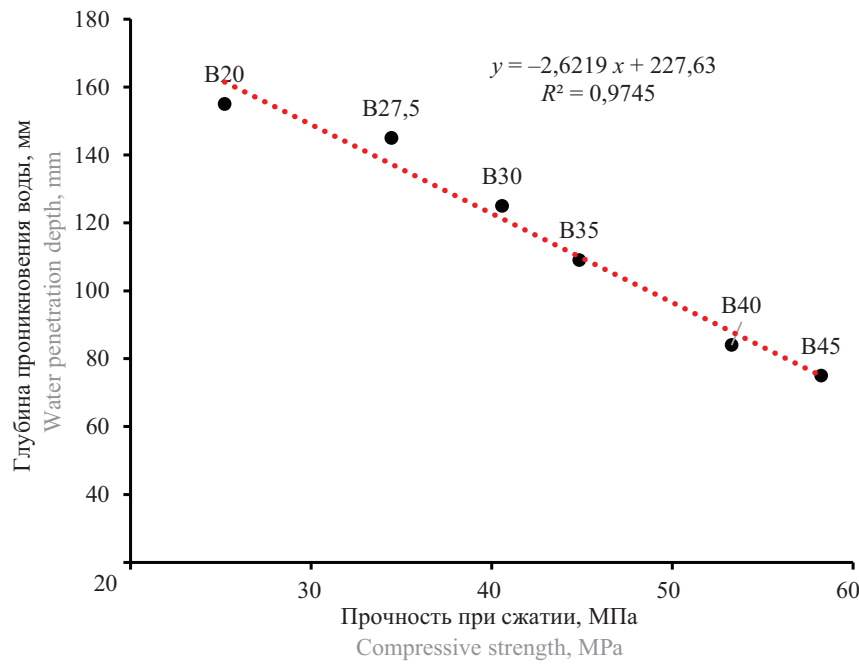


Рис. 5. Зависимость глубины проникновения воды под давлением в ГЦПВ-бетона от его прочности

Fig. 5. Dependence of the depth of water penetration under pressure into GCPB concrete on its strength

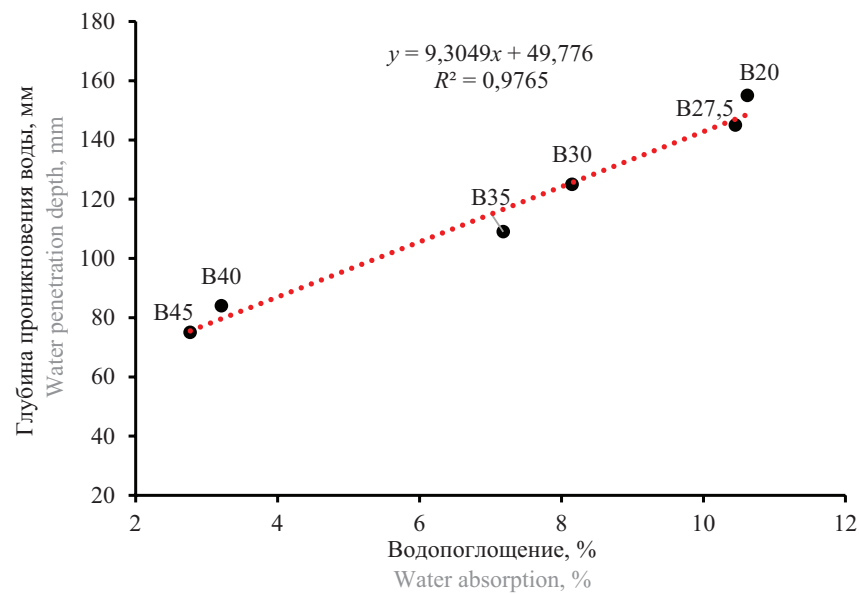


Рис. 6. Зависимость глубины проникновения воды под давлением в ГЦПВ-бетон от его водопоглощения

Fig. 6. Dependence of the depth of water penetration under pressure into GCPB concrete on its water absorption

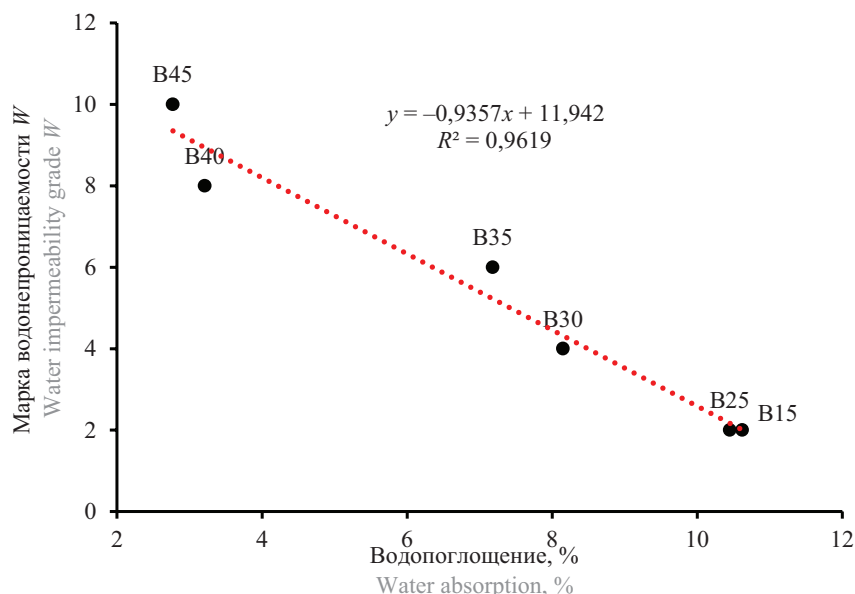


Рис. 7. Зависимость марки по водонепроницаемости ГЦПВ-бетона от показателя водопоглощения

Fig. 7. Dependence of the grade of water impermeability of GCPB concrete on the index of water absorption

от В20 до В45. Значения глубины проникания воды в образцы ГЦПВ-бетона тем больше, чем выше его значение водопоглощения (рис. 6). Минимальной глубиной проникновения воды под давлением в 0,5 МПа, равной 75 мм (табл. 6), обладает состав бетона С4 с классом по прочности на сжатие В45 и соответствует стандартной марке по водонепроницаемости W10. Мелкозернистый ГЦПВ-бетон с классом по прочности В40 (без фиброармирования) имеет глубину проникания воды под давлением 0,5 МПа, равную 84 мм, что позволяет отнести его к марке по водонепроницаемости W8. В общем глубина проникновения воды в разработанных составах ГЦПВ-бетонов с классом по прочности от В20 до В45 варьируется от 75 до 145 мм, что соответствует маркам по водонепроницаемости от W2 до W10 по [44] (рис. 7).

Итак, знание марки водонепроницаемости мелкозернистого ГЦПВ-бетона позволит определять его назначение при строительстве зданий в климатических условиях Йеменской Республики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа данных, полученных в ходе эксперимента, можно сделать следующие выводы.

Механические свойства мелкозернистого ГЦПВ-бетона могут быть значительно улучшены за счет оптимального гранулометрического состава мелко-го заполнителя, армирования фибровым волокном и применения различных комплексных химических добавок. В зависимости от классов по прочности

В20–В45 разработанные составы имеют следующие механические и гидрофизические свойства: прочность при сжатии от 25 до 60 МПа, водопоглощение от 2,8 до 10,6 %, коэффициент размягчения от 0,75 до 1,17 и водонепроницаемость W2–W10. Это позволяет отнести эти бетоны к долговечным материалам, которые способны в конструкции воспринимать большие нагрузки и противостоять износу с течением времени.

По результатам гидрофизических испытаний наилучшим является состав ГЦПВ-бетона под номером С4 с классом по прочности В45, водопоглощением 2,8 % и маркой по водонепроницаемости W10.

Установлено, что мелкозернистый ГЦПВ-бетон имеет практически линейную зависимость водопоглощения от его прочности на сжатие.

Совместное применение с добавками Master Glenium 112 и Flocrete WP Crystal фибрового армирования для приготовления ГЦПВ-бетона способствовало получению высокой прочности и водонепроницаемости.

Полученные зависимости имеют существенное значение в практическом применении, так, по значению водопоглощения можно спрогнозировать марку ГЦПВ-бетона по водонепроницаемости.

Для получения полной информации о ГЦПВ-бетоне и применения его для изготовления железобетонных изделий следует оценить его защитные свойства по отношению к арматуре, а также конструкционные показатели (призмную прочность, модуль упругости и т.п.).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хантимиров А.Г., Сулейманов А.М., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хохряков О.В. Влияние модификации на долговечность поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65). С. 26–35. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_26. EDN CMSMHV.
2. Альтдинова А.И., Хамидуллина Н.Р., Кузнецова Г.В. Влияние вида песка на долговечность и свойства силикатных изделий автоклавного твердения // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. № 1 (11). С. 30–39. EDN JEDODO.
3. Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Строганов В.Ф. Повышение характеристик дорожных цементогрунтов кремнийорганическими соединениями // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 4 (66). С. 301–309. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_301. EDN JZUJND.
4. Хозин В.Г., Морозова Н.Н., Матеюнас А., Захарова Н.А., Акимова Э.П. Исследование внутренней коррозии модифицированных монолитных бетонов на основе местных заполнителей РТ // Технологии бетонов. 2008. № 3. С. 58.
5. Беляков А.Ю., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Функционализированный минеральный наполнитель — эффективный модификатор цементных бетонов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65). С. 45–56. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_45. EDN FCPOKY.
6. Хабибуллина В.С., Аюпов Д.А. Прогноз старения модифицированных битумов // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. № 1 (12). С. 154–156. EDN GJTGMN.
7. Антонян А.А. Водонепроницаемость бетона с суперпластификаторами // Технологии бетонов. 2017. № 3–4 (128–129). С. 36–39. EDN ZBMNUX.
8. Ферронская А.В., Коровяков В.Ф. Гипсовые вяжущие в ресурсосберегающих системах малоэтажного строительства // Сухие строительные смеси. 2005. № 3. С. 56–57.
9. Гончаров Ю.А., Бурьянов А.Ф. Ключевые факторы успешного развития отрасли гипсовых материалов // Строительные материалы. 2013. № 2. С. 70–72. EDN PXESTF.
10. Ферронская А.В. и др. Гипс в малоэтажном строительстве. М. : Изд-во АСВ, 2008. EDN QNNSHH.
11. Бабков В.В., Латыпов В.М., Ломакина Л.Н., Шигапов Р.И. Модифицированные гипсовые вяжущие повышенной водостойкости и гипсокерамзитобетонные стеновые блоки для малоэтажного жилищного строительства на их основе // Строительные материалы. 2012. № 7. С. 4–8. EDN PFTJZL.
12. Пуценко К.Н., Балабанов В.Б. Перспективы развития и применения сухих строительных смесей на основе гипса // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 7 (102). С. 148–154. EDN UBLONF.
13. Изотов В.С., Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Исследование влияния активных минеральных добавок на реологические и физико-механические свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Строительные материалы. 2015. № 5. С. 20–23. EDN TUHVEN.
14. Чернышева Н.В. Водостойкие гипсовые композиционные материалы с применением техногенного сырья : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Белгород, 2014. 22 с. EDN ZPPRAN.
15. Аунг Ч.Н., Потапова Е.Н. Влияние вида пуццолановой добавки на состав и свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36. № 3 (252). С. 7–9. EDN BXMIEA.
16. Кайс Х.А., Богданов Р.Р., Морозова Н.Н., Мавлюбердинов А.Р., Сулейманова Л.А. Влияние суперпластифицирующих добавок на основе эфира поликарбоксилата на технологические и физико-технические 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. EDN RXUQHT.
17. Кайс Х.А., Морозова Н.Н. Влияние пластифицирующих добавок на свойства комплексного гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (опыт Республики Йемен) // Известия вузов. Строительство. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 8 (788). С. 57–70. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-57-70. EDN OGSNHC.
18. Нуриев М.И., Халиуллин М.И., Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р., Хайрварина А.М., Стоянов О.В. Влияние пластифицирующих добавок на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 6. С. 119–122. EDN RTPNGF.
19. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Лукманова Л.В. Влияния пластифицирующих добавок на основные свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на основе низкомарочного и техногенного сырья // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4 (38). С. 382–387. EDN XAKONT.
20. Галаутдинов А.Р., Мухаметрахимов Р.Х. Повышение водостойкости гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на основе низкомарочного гипса // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4 (38). С. 333–343. EDN XAKOLB.
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. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-830-11-63-72. EDN CBGAYY.

22. Mukhametrakhimov R., Galautdinov A., Gorbunova P., Gorbunova T. Water-resistant fiberreinforced gypsum cement-pozzolan composite // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 138. P. 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/201913801011

23. Курдюмова С.Е., Потанова Е.Н. Влияние полипропиленовых волокон на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31. № 3 (184). С. 55–57. EDN ZRTOSV.

24. Potapova E., Manushina A., Urbanov A. Effect of fibers on the properties of gypsum-cement-pozzolan binder // ZKG International. 2017. Vol. 70. Issue 11. Pp. 42–50. EDN XXLXPV.

25. Лесовик В.С., Урханова Л.А., Федюк Р.С. Вопросы повышения непроницаемости фибробетонов на композиционном вяжущем // Вестник ВСГУТУ. 2016. № 1 (58). С. 5–10. EDN VQECDN.

26. Кожухова М.И., Чулкова И.Л., Хархардин А.Н., Соболев К.Г. Оценка эффективности применения гидрофобных водных эмульсий с содержанием нано- и микроразмерных частиц для модификации мелкозернистого бетона // Строительные материалы. 2017. № 5. С. 92–97. EDN YQGAPD.

27. Залипаева О.А. Морозостойкость и проницаемость бетона на смеси пористых и плотных заполнителей // Вестник Череповецкого государственного университета. 2012. № 3–2 (41). С. 7–10. EDN PCEDSR.

28. Soongswang P., Tia M., Bloomquist D. Factors affecting the strength and permeability of concrete made with porous limestone // ACI Materials Journal. 1991. Vol. 88. Issue 4. DOI: 10.14359/1915

29. Ahmad S., Azad A.K., Loughlin K.F. Effect of the Key Mixture Parameters on Tortuosity and Permeability of Concrete // Journal of Advanced Concrete Technology. 2012. Vol. 10. Issue 3. Pp. 86–94. DOI: 10.3151/jact.10.86

30. Winslow D.N., Cohen M.D., Bentz D.P., Snyder K.A., Garboczi E.J. Percolation and pore structure in mortars and concrete // Cement and Concrete Research. 1994. Vol. 24. Issue 1. Pp. 25–37. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90079-5

31. Halamickova P., Detwiler R.J., Bentz D.P., Garboczi E.J. Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: Relationship to sand content and critical pore diameter // Cement and Concrete Research. 1995. Vol. 25. Issue 4. Pp. 790–802. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00069-0

32. Warda B.A., Munaz A.N. Effects of Aggregate Gradation on Water Permeability of Concrete // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 488–489. Pp. 248–252. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.488-489.248

33. Ванькова Н.Р., Фомина А.Е. Сравнительный эксперимент по определению водонепроницаемости бетона методами «мокрого пятна» и «по воздухо-

проницаемости» // Construction and Geotechnics. 2022. Т. 13. № 1. С. 96–105. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.08. EDN CFZRYX.

34. Закошмиренный А.И. Сравнение результатов водонепроницаемости бетона подземных сооружений в натурных условиях, получаемых с использованием прямых и косвенных методов испытаний // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 4. С. 282–294. EDN KVOEEL.

35. Антонян А.А. О некоторых особенностях современных методов определения водонепроницаемости бетона // Технологии бетонов. 2017. № 9–10 (134–135). С. 29–33. EDN YMQQFZ.

36. Семенов С.Я., Арьков Д.П., Марченко С.С. Экспресс-метод диагностирования водонепроницаемости бетона конструкций гидротехнических сооружений // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2016. № 3 (43). С. 213–220. EDN WWHGHF.

37. Патент RU № 2558824. Способ определения водонепроницаемости строительных материалов / Кесарийский А.Г., Кондраченко В.И., Кондраченко Е.В., Кендюк А.В., Гусева А.Ю.; заявл. № 2014116874/15 от 28.04.2014; опубл. 10.08.2015. 9 с.

38. Патент RU № 2795491. Гидроизоляционное сооружение / Смирнов Э.В., Зданович М.Я., Урминский Д.Г., Скопинов М.В., Русаков М.И., Носов О.А., Елькин А.А.; заявл. № 2022125751/22 от 29.09.2022; опубл. 04.05.2023. 7 с.

39. Kassim M.M. The water permeability properties of re-vibrated lightweight concrete // Journal of Metals, Materials and Minerals. 2020. Vol. 30. Issue 1. DOI: 10.55713/jmmm.v30i1.575

40. Saif Allah S.J., Kassim M.M., Salman G.A. Concrete Mix Strength and Permeability with Various Supplementary Cementitious Materials // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 427. P. 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/202342702005

41. Hung V.V., Seo S.Y., Kim H.W., Lee G.C. Permeability and strength of pervious concrete according to aggregate size and blocking material // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 1. P. 426. DOI: 10.3390/su13010426

42. Кайс Х.А., Морозова Н.Н., Богданов А.Н. Влияние вида и зернового состава песка на свойства мелко-зернистого бетона на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (опыт Республики Йемен) // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 9 (789). С. 65–76. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-65-76. EDN ZFDWKE.

43. Morozova N., Kais K., Gilfanov R., Morozov V. Influence of the fractional composition of the aggregate on the technological and strength properties of HCPV concrete // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2487. P. 020009. DOI: 10.1063/5.0091723

44. Антонян А.А. Сравнительная оценка методов определения водонепроницаемости бетонов на примере исследования влияния содержания цемента // Бетон и железобетон. 2015. № 2. С. 44–47.

Поступила в редакцию 14 января 2025 г.

Принята в доработанном виде 20 января 2025 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Хамза Абдулмалек Кайс** — инженер-исследователь; **Университет Саны**; 13064, г. Сана, Йеменская Республика; SPIN-код: 9386-8763, РИНЦ ID: 868818, ORCID: 0009-0000-2805-7760; hamza.qais@mail.ru;

Нина Николаевна Морозова — кандидат технических наук, доцент; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0000-0002-7867-4203; ninamor@mail.ru.

Вклад авторов:

Кайс Х.А. — концепция исследования, написание статьи, сбор материала, обработка материала.

Морозова Н.Н. — научное руководство, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Khantimirov A.G., Sulejmanov A.M., Abdrahmanova L.A., Nizamov R.K., Khokhryakov O.V. The effect of modification on the durability of polyvinyl chloride wood-polymer composites. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 3(65):26-35. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_26. EDN CMSMHV. (rus.).
2. Altdinova A.I., Khamidullina N.R., Kuznetsova G.V. The influence of the type of sand on the durability and properties of autoclave-hardened silicate products. *Polymers in Construction: Scientific Online Journal*. 2023; 1(11):30-39. EDN JEDODO. (rus.).
3. Vdovin E.A., Bulanov P.E., Stroganov V.F. Improving the characteristics of road soil-cement with organosilicon compounds. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 4(66):301-309. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_301. EDN JZUJND. (rus.).
4. Khozin V.G., Morozova N.N., Mateyunas A., Zakharova N.A., Akimova E.P. Study of internal corrosion of modified monolithic concretes based on local RT fillers. *Concrete technologies*. 2008; 3:58. (rus.).
5. Belyakov A.Yu., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Functionalized mineral filler is an effective modifier for cement concrete. *News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2023; 3(65):45-56. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_45. EDN FCPOKY. (rus.).
6. Khabibullina V.S., Ayupov D.A. Forecast of aging of modified bitumen. *Polymers in Construction: scientific internet journal*. 2024; 1(12):154-156. EDN GJTGMN. (rus.).
7. Antonyan A.A. Resistance of concrete with superplasticizers. *Concrete Technologies*. 2017; 3-4(128-129): 36-39. EDN ZBMNUX. (rus.).
8. Ferronskaya A.V., Korovyakov V.F. Gypsum binders in resource-saving systems of low-rise construction. *Dry Building Mixtures*. 2005; 3:56-57. (rus.).
9. Goncharov Yu.A., Buryanov A.F. Key factors for successful development of the gypsum materials industry. *Construction Materials*. 2013; 2:70-72. EDN PXESTF. (rus.).
10. Ferronskaya A.V. et al. *Gypsum in low-rise construction*. Moscow, Publishing house ASV, 2008. EDN QNNSHH. (rus.).
11. Babkov V.V., Latypov V.M., Lomakina L.N., Shigapov R.I. Modified gypsum binders with increased water resistance and gypsum expanded clay concrete wall blocks for low-rise housing construction based on them. *Construction Materials*. 2012; 7:4-8. EDN PFTJZL. (rus.).
12. Putsenko K., Balabanov V. Development and application prospects of dry gypsum-based construction mixtures. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015; 7(102):148-154. EDN UBLONF. (rus.).
13. Izotov V.S., Muhametrahimov A.D., Galautdinov A.R. Study of influence of active mineral additives on rheological and physical-mechanical properties of a gypsum-cement-pozzolanic binder. *Construction Materials*. 2015; 5:20-23. EDN TUHVEN. (rus.).
14. Chernysheva N.V. *Waterproof gypsum composite materials using technogenic raw materials : abstract of dis. ... cand. of technical sciences*. Belgorod, 2014; 22. EDN ZPPRAH. (rus.).
15. Aung K.N., Potapova E.N. Influence of the type of pozzolan additive on the composition and properties of gypsum-cement-pozzolan binder. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2022; 36(3):(252):7-9. EDN BXMIEA. (rus.).
16. Qais H., Bogdanov R., Morozova N., Mavlyuberdinov A., Suleymanova L. Influence of superplasticizing additives based on polycarboxylate ether on the technological and physical-technical properties of gypsum-cement-pozzolan binder. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2024; 8:20-28. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-20-28. EDN RXUQHT. (rus.).
17. Qais H.A., Morozova N.N. Influence of plasticizing additives on the properties of complex gypsum-

cement-pozzolan binder (experience of the republic of Yemen). *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; 8(788):57-70. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-57-70. EDN OGSNHC. (rus.).

18. 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; 18(6):119-122. EDN RTPNGF. (rus.).

19. Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Lukmanova L.V. The effects of plasticizers on the basic properties of the gypsum cement-pozzolan binder based on low branded gypsum and technogenic raw materials. *News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2016; 4(38):382-387. EDN XAKONT. (rus.).

20. Galautdinov A.R., Mukhametrakhimov R.Kh. Improving water resistance quality of gypsum cement-pozzolan binder based on low-strength gypsum. *News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2016; 4(38):333-343. EDN XAKOLB. (rus.).

21. Qais H.A., Morozova N.N., Khokhryakov O.V. Comparative effectiveness of hydrophobizing and crystallizing additives effects on the properties of gypsum-cement-pozzolan binder and concrete based on it. *Construction Materials*. 2024; 11:63-72. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-830-11-63-72. EDN CBGAYY. (rus.).

22. Mukhametrakhimov R., Galautdinov A., Gorbunova P., Gorbunova T. Water-resistant fiberreinforced gypsum cement-pozzolan composites. *E3S Web of Conferences*. 2019; 138:01011. DOI: 10.1051/e3sconf/201913801011

23. Kurdyumova S.E., Potapova E.N. Influence of polypropylene fibers on the properties of gypsum-cement-pozzolan binder. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2017; 31(3):(184):55-57. EDN ZRTOSV. (rus.).

24. Potapova E., Manushina A., Urbanov A. Effect of fibers on the properties of gypsum-cement-pozzolan binder. *ZKG International*. 2017; 70(11):42-50. EDN XXLXPV.

25. Lesovik V.S., Urkhanova L.A., Fediuk R.S. Issues of improvement leaks fiber-reinforced concrete on composite binders. *ESSUTM Bulletin*. 2016; 1(58):5-10. EDN VQECDN. (rus.).

26. Kozhukhova M.I., Chulkova I.L., Kharkharin A.N., Sobolev K.G. Estimation of application efficiency of hydrophobic water-based emulsions containing nanoandmicro-sized particles for modification of fine grained concrete. *Construction Materials*. 2017; 5:92-97. EDN YQGAPD. (rus.).

27. Zalipaeva O.A. Frost resistance and permeability of concrete on a mixture of porous and dense fillers. *Cherepovets State University Bulletin*. 2012; 3-2(41):7-10. EDN PCEDSR. (rus.).

28. Soongswang P., Tia M., Bloomquist D. Factors affecting the strength and permeability of concrete made

with porous limestone. *ACI Materials Journal*. 1991; 88(4). DOI: 10.14359/1915

29. Ahmad S., Azad A.K., Loughlin K.F. Effect of the Key Mixture Parameters on Tortuosity and Permeability of Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2012; 10(3):86-94. DOI: 10.3151/jact.10.86

30. Winslow D.N., Cohen M.D., Bentz D.P., Snyder K.A., Garboczi E.J. Percolation and pore structure in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*. 1994; 24(1):25-37. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90079-5

31. Halamickova P., Detwiler R.J., Bentz D.P., Garboczi E.J. Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: Relationship to sand content and critical pore diameter. *Cement and Concrete Research*. 1995; 25(4):790-802. DOI: 10.1016/0008-8846(95)00069-o

32. Warda B.A., Munaz A.N. Effects of Aggregate Gradation on Water Permeability of Concrete. *Advanced Materials Research*. 2012; 488-489:248-252. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.488-489.248

33. Vankova N.R., Fomina A.E. Comparative experiment to determine the waterproofness of concrete by “wet spot” and “breathability” methods. *Construction and Geotechnics*. 2022; 13(1):96-105. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.08. EDN CFZRYX. (rus.).

34. Zakorshmenniy A.I. Comparison of the results of water resistance of concrete of underground structures in natural conditions, obtained using direct and indirect methods. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2007; 4:282-294. EDN KVOEEL. (rus.).

35. Antonyan A.A. On some features of modern methods for determining the waterproofness of concrete. *Concrete Technologies*. 2017; 9-10(134-135):29-33. EDN YMQQFZ. (rus.).

36. Semenenko S.Y., Arkov D.P., Marchenko S.S. Express method for diagnosing water resistance of concrete structures of hydraulic structures. *News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2016; 3(43):213-220. EDN WWHGHF. (rus.).

37. Patent RU No. 2558824. *Method for determining water resistance of building materials* / Kesariyskiy A.G., Kondrashchenko V.I., Kondrashchenko E.V., Kendyuk A.V., Guseva A.Yu.; declared No. 2014116874/15 dated 28.04.2014; publ. 10.08.2015; 9. (rus.).

38. Patent RU No. 2795491. *Waterproofing structure* / Smirnov E.V., Zdanovich M.Ya., Urminsky D.G., Skopinov M.V., Rusakov M.I., Nosov O.A., Elkin A.A.; declared. No. 2022125751/22 dated 09.29.2022; published 05.04.2023; 7. (rus.).

39. Kassim M.M. The water permeability properties of re-vibrated lightweight concrete. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2020; 30(1). DOI: 10.55713/jmmm.v30i1.575

40. Saif Allah S.J., Kassim M.M., Salman G.A. Concrete Mix Strength and Permeability with Various Supplementary Cementitious Materials. *E3S Web*

of Conferences. 2023; 427:02005. DOI: 10.1051/e3s-conf/202342702005

41. Hung V.V., Seo S.Y., Kim H.W., Lee G.C. Permeability and strength of pervious concrete according to aggregate size and blocking material. *Sustainability*. 2021; 13(1):426. DOI: 10.3390/su13010426

42. Qais H.A., Morozova N.N., Bogdanov A.N. Influence of the type and grain composition of sand on the properties of fine-grain concrete based on gypsum-cement-pozzolanic binder (experience of the republic of Yemen). *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; 9(789):65-76. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-789-9-65-76. EDN ZFDWKE. (rus.).

43. Morozova N., Kais K., Gilfanov R., Morozov V. Influence of the fractional composition of the aggregate on the technological and strength properties of HCPV concrete. *AIP Conference Proceedings*. 2022; 2487:020009. DOI: 10.1063/5.0091723

44. Antonyan A.A. Comparative assessment of methods for determining the water resistance of concrete using the example of studying the influence of cement content. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2015; (2):44-47. (rus.).

Received January 14, 2025.

Adopted in revised form on January 20, 2025.

Approved for publication on February 13, 2025.

B I O N O T E S : **Hamza A. Qais** — research engineer; **University of Sana'a**; Sana'a, 13064, Republic of Yemen; SPIN-code: 9386-8763, ID RSCI: 868818, ORCID: 0009-0000-2805-7760; hamza.qais@mail.ru;

Nina N. Morozova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7867-4203; ninamor@mail.ru.

Contribution of the authors:

Hamza A. Qais — concept of research, article writing, research, illustrations.

Nina N. Morozova — scientific management, scientific text editing.

The authors declare that there is no conflict of interests.