

УДК 691.263.5

DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-67-78

КОМПОЗИЦИОННОЕ ГИПСОВОЕ ВЯЖУЩЕЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОЛОМИТОВОЙ МУКИ И ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ**М.П. ТОЛМАЧ, Н.В. РАЩИНСКИЙ, канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА**
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлены результаты исследований физико-механических свойств композиционного гипсового вяжущего (КГВ), содержащего в своем составе золошлаковую смесь, доломитовую муку и портландцемент. Получены математические модели влияния рецептурных факторов на основные физико-механические свойства КГВ: прочность при сжатии, прочность на растяжение при изгибе, плотность, водопоглощение и пористость, позволяющие провести оптимизацию состава сырьевых компонентов композиционного гипсового вяжущего. Показано, что, изменяя содержание рецептурных факторов в составе КГВ, можно варьировать физико-механические характеристики: прочность на сжатие в диапазоне от 9,4 до 13,2 МПа, прочность на растяжение при изгибе – от 3,2 до 5,7 МПа, плотность – от 1345 до 1468 кг/м³, водопоглощение – от 18,2 до 24,4%. На основе оптимизированного состава сырьевой смеси КГВ получен гипсобетон с прочностью на сжатие 13,3 МПа и коэффициентом размягчения 0,44, который может быть использован для изготовления стеновых блоков.

Ключевые слова: композиционное гипсовое вяжущее, золошлаковые отходы, доломитовая мука, оптимизация состава, физико-механические свойства, гипсобетон.

Введение. Одним из направлений решения важнейшей задачи современного строительства, заключающейся в ресурсо- и энергосбережении, является разработка и применение материалов на основе местных сырьевых ресурсов и отходов производства. Особое значение уделяется стеновым ограждающим конструкциям, которые наряду с высокими теплотехническими показателями должны быть долговечными, экологически чистыми и пожаробезопасными. Этим требованиям отвечают стеновые материалы на основе композиционных гипсовых вяжущих. Эколого-экономические аспекты производства и применения гипсовых материалов и изделий рассматриваются в работах А.В. Волженского [1], А.Ф. Ферронской¹, Н.Н. Башкатова [2], Е.В. Войтович², В.Б. Петропавловской³, Д.Е. Кучерова⁴, где отмечается, что при реализации технологии КГВ отсутствует высокотемпературный синтез, являющийся основой подавляющего большинства технологий получения минеральных вяжущих, отсутствуют выбросы CO₂, пыли и других вредных компонентов, и в целом производство самих КГВ и материалов на их основе менее энергоемко по сравнению с производством портландцемента и извести. Разработке и исследованию свойств КГВ посвящен ряд исследований^{5,6,7}, в которых показано, что материалы и изделия на основе композиционных гипсовых вяжущих имеют свои конкурентные преимущества, заключающиеся в обеспечении оптимального температурно-влажностного режима в помещениях, показателях тепло- и звукоизоляции, не уступающие или выше, чем у аналогичных материалов на цементном вяжущем при более простой технологии производства.

В качестве структурообразующих компонентов КГВ исследователи⁸ [3–7] наряду с природным сырьем предлагают включать в состав КГВ и показывают эффективность применения отходов промышленных предприятий, среди них: кремнеземный компонент, торфяная зола, перлитовая пыль, керамзитовая пыль, литейный шлак, золошлаковые отходы (ЗШО). Характеристики применяемых промышленных отходов существенно отличаются, что требует от разработчиков при применении нового сырьевого компонента в составе КГВ проведения комплекса исследований по определению оптимального содержания компонентов для достижения требуемых эксплуатационных характеристик.

¹ Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): Справочник / под общ. ред. А.Ф. Ферронской. – М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2004. – 485 с.

² Войтович Е.В. Композиционное гипсовое вяжущее с применением наноструктурированного кремнеземистого компонента и материалы на его основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Белгород, 2012. – 23 с.

³ Петропавловская В.Б. Безобжиговые гипсовые композиты с повышенными эксплуатационными свойствами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09. – Тверь, 2019. – 34 с.

⁴ Кучеров Д.Е. Композиционные вяжущие с минеральными добавками различного генезиса и бетоны на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Белгород, 2011. – 145 л.

⁵ См. сноски 2–4.

⁶ Гаифуллин А.Р. Композиционные гипсовые материалы с добавками керамзитовой пыли: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Казань, 2012. – 20 с.

⁷ Алтыкис М.Г. Экспериментально-теоретические основы получения композиционных и многофазовых гипсовых вяжущих веществ для сухих строительных смесей и материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. – Пенза, 2003. – 48 с.

⁸ См. сноски 2–4, 6, 7.

Местными сырьевыми ресурсами Витебского региона Республики Беларусь являются доломитовая мука производства ОАО «Доломит» и золошлаковые отходы от сжигания торфодревесной смеси по технологии кипящего слоя на Белорусской ГРЭС в г.п. Ореховск. В общем по республике объем золошлаковых отходов, образующихся в течение года, составляет около 13 тыс. т, находится на золоотвалах 119,8 тыс. т. [8]. Вопрос совместимости доломитовой муки с золошлаковыми отходами от сжигания торфодревесной смеси в составе КГВ для получения допустимых эксплуатационных характеристик КГВ в научной литературе не освещен. В связи с этим проведение исследований по оценке совместимости данного сырья в составе КГВ, получение новых экспериментальных данных о реологических и физико-механических свойствах КГВ с золошлаковыми отходами и доломитовой мукой, получение закономерностей влияния компонентного состава на свойства КГВ и разработка состава сырьевой смеси КГВ для стеновых материалов достаточно актуальны.

Настоящие исследования были направлены на решение следующих задач:

- 1) исследование влияния на реологические и физико-механические свойства КГВ, изменение рецептуры путем включения в состав двухкомпонентной комплексной добавки, состоящей из портландцемента и золошлаковой смеси, портландцемента и доломитовой муки;
- 2) оптимизация состава трехкомпонентной комплексной добавки КГВ на основе низкомарочного гипса с использованием метода математического планирования эксперимента;
- 3) исследование физико-механических свойств гипсобетонов на основе КГВ, включая плотность, прочность, водопоглощение, коэффициент теплопроводности и звукоизоляционные свойства.

Исследования проводились в рамках НИР «Легкие бетоны на основе биозаполнителя и комплексного гипсового вяжущего для стеновых ограждений», выполняемой по гранту Министерства образования Республики Беларусь (номер государственной регистрации 20230695 от 16.05.2023).

Характеристика материалов и методика проведения исследований. Для проведения экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

- гипс строительный «Тайфун Мастер» № 35 марки Г-5 III А производства ООО «Тайфун» по ГОСТ 125⁹; время начала схватывания гипса составило 9 мин 30 с, время окончания схватывания – 15 мин, коэффициент нормальной плотности – 0,56;
- гипс строительный марки Г-4 КНАУФ-Шнелгипс по ГОСТ 125⁹; время начала схватывания гипса составило 6 мин, время окончания схватывания – 10 мин, коэффициент нормальной плотности – 0,64;
- вода для затворения вяжущего и гипсобетона по ГОСТ 23732¹⁰;
- золошлаковая смесь, которая образуется при сжигании топливной смеси, состоящей из 50% древесной щепы и 50% торфа, на Белорусской ГРЭС г.п. Ореховск Витебской области. Химический состав золошлаковой смеси по ГОСТ 10538¹¹ представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав золошлаковой смеси Белорусской ГРЭС (мас., %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	ППП
87.62	4.39	1.08	3.08	0.55	0.61	1.79	0.24	0.19	<0.10	0.07

По химическому составу золошлаковая смесь состоит на 92% из оксидов кремния и алюминия. Содержание оксида кальция и оксида магния составляет 3,63%, т.е. по модулю основности ($M_o < 1$) золошлаковая смесь относится к кислым. Влажность золошлаковой смеси составляла 6%, тонкость помола (остаток на сите № 008) – 2,3%, насыпная плотность – 960 кг/м³;

- мука известняковая (доломитовая) по ГОСТ 14050¹², изготовитель «Доломит» ОАО, г. Витебск, Беларусь; влажность доломитовой муки составила 0,23%, тонкость помола (остаток на сите № 008) – 0,07%;
- портландцемент Белорусской цементной компании ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108¹³; нормальная густота – 26%, начало схватывания – 150 мин, конец схватывания – 205 мин, предел прочности на сжатие в возрасте 28 сут – 49,5 МПа, тонкость помола (остаток на сите № 008) – 1,8%.

Сроки схватывания, прочность на растяжение при изгибе, прочность при сжатии, водопоглощение, водостойкость гипсового вяжущего определялись по методике ГОСТ 23789¹⁴, пористость – по ГОСТ 12730.4¹⁵, плотность – по ГОСТ 12730.1¹⁶. Для проведения испытаний изготавливались образцы-балочки размером 40×40×160 мм. Прочность на растяжение при изгибе определялась путем испытаний образцов на испытательной машине МИИ-100, прочность на сжатие – на прессе гидравлическом ПГМ-1000МГ4 А.

⁹ ГОСТ 125-2018 Вяжущие гипсовые. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.

¹⁰ ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. – М.: Госстандарт, 2013. – 18 с.

¹¹ ГОСТ 10538-87 Топливо твердое. Методы определения химического состава золы. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1988. – 15 с.

¹² ГОСТ 14050-93 Мука известняковая (доломитовая). Технические условия. – Минск: Изд-во стандартов, 2003. – 12 с.

¹³ ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2020. – 15 с.

¹⁴ ГОСТ 23789-2018 Вяжущие гипсовые. Методы испытаний. – М.: Госстандарт, 2019. – 18 с.

¹⁵ ГОСТ 12730.4-2020 Бетоны. Методы определения параметров пористости. – М.: Госстандарт, 2021. – 14 с.

¹⁶ ГОСТ 12730.1-2020 Бетоны. Методы определения плотности. – М.: Госстандарт, 2020. – 13 с.

Для определения физико-механических характеристик гипсобетона на основе оптимизированного состава КГВ изготавливались образцы-кубы с ребром 70 мм. Прочность гипсобетона на сжатие определяли по ГОСТ 10180¹⁷, водопоглощение – по ГОСТ 12730.3¹⁸. Образцы сушили при температуре 50±5 °С до постоянного веса в сушильном шкафу SNOL60/300 LFN. Коэффициент теплопроводности измеряли с помощью прибора ИТП-МГ4 на образцах плит размером 250×250×30 мм по СТБ 1618¹⁹. Звукоизоляционные свойства гипсобетона исследовали с помощью учебной акустической камеры по СТБ EN ИСО 10140-4:2013²⁰. Математическая обработка результатов исследования проводилась в компьютерной программе «PlanExp B-D13», разработанной в среде программирования Microsoft Visual Basic 6.0.

Экспериментальные исследования. Последовательность проведения экспериментальных исследований была направлена на определение влияния на свойства КГВ портландцемента как основного компонента и портландцемента в сочетании с минеральными добавками, являющимися местными сырьевыми ресурсами: золошлаковой смесью и доломитовой мукой. Важнейшими показателями КГВ, которые в дальнейшем определяют качество изделий, являются реологические и физико-механические характеристики. В экспериментальных исследованиях изучались следующие реологические характеристики КГВ: начало, конец и продолжительность схватывания. Для проведения исследований использовались гипс строительный марки Г-4 КНАУФ-Шнелгипс и портландцемент ЦЕМ I 42,5Н. Было изготовлено три состава КГВ с содержанием портландцемента 5, 10 и 15% от массы гипсового вяжущего. Водогипсовое отношение, равное 0,64, соответствовало нормальной густоте гипсового вяжущего. Результаты исследования представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Влияние портландцемента на реологические свойства КГВ

Номер состава	Портланд-цемент, % от массы гипсового вяжущего	Начало схватывания, мин-с	Конец схватывания, мин-с	Продолжительность схватывания, мин-с	Плотность кг/м ³ , в возрасте 7 сут	Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 7 сут		Прочность на сжатие в возрасте 7 сут	
						МПа	%	МПа	%
контр.	0	6	10	4	1242	1,99	100	3,36	100
1	2	5–30	9-30	5	1296	2,75	138	3,60	107
2	5	2	8	6	1328	2,64	133	5,14	153
3	10	2–30	7	4–30	1331	2,69	135	5,22	155
4	15	3	5–30	2–30	1335	2,96	148	4,79	142

В результате исследований было установлено, что введение портландцемента в состав гипсового вяжущего ускоряет начало и конец схватывания. При этом наибольшее сокращение времени начала схватывания произошло при введении портландцемента в количестве, равном 5% от массы гипсового вяжущего, и составило 2 мин, в отличие от 6 мин – времени начала схватывания гипсового вяжущего без портландцемента. Дальнейшее увеличение количества портландцемента не оказывает существенного влияния на начало схватывания. Так, увеличение количества портландцемента на каждые 5% массы гипсового вяжущего отдаляло начало схватывания на 30 с. При этом продолжительность схватывания увеличилась с 4 до 6 мин при введении портландцемента в количестве 5% от массы гипсового вяжущего; при введении портландцемента в количестве 10% продолжительность схватывания сопоставима с гипсовым вяжущим контрольного состава. При увеличении количества портландцемента до 15% продолжительность структурообразования гипсоцементного камня сократилась до 2 мин 30 с.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение количества портландцемента в составе КГВ приводит к увеличению прочности на растяжение при изгибе на 48% при количестве 15% от массы гипсового вяжущего, к увеличению прочности на сжатие на 55% при количестве 10% от массы гипсового вяжущего. При увеличении количества портландцемента с 10 до 15% прочность на сжатие снизилась на 13%. С увеличением количества портландцемента плотность камня из гипсоцементного композита увеличилась с 1242 кг/м³ до 1335 кг/м³ при количестве портландцемента 15% от массы гипсового вяжущего.

Исследование влияния доломитовой муки на свойства композиционного гипсового вяжущего. На основании анализа реологических и прочностных характеристик для проведения дальнейших исследований принято количество портландцемента в составе КГВ, равное 10% от массы гипсового вяжущего. Доломитовая мука вводилась в количестве 5, 10 и 20% от массы гипсового вяжущего. Испытания проводились с использованием строительного гипса марки Г-4 КНАУФ-Шнелгипс. Водогипсовое отношение было равно 0,64. Результаты исследований влияния доломитовой муки на свойства композиционного гипсового вяжущего представлены в таблице 3.

¹⁷ ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Госстандарт, 2015. – 33 с.

¹⁸ ГОСТ 12730.3-2020 Бетоны. Метод определения водопоглощения. – М.: Госстандарт, 2020. – 10 с.

¹⁹ СТБ 1618-2006 Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме. – М.: Минстройархитектура, 2006. – 12 с.

²⁰ СТБ EN ISO 10140-4:2013 Акустика. Лабораторные измерения звукоизоляции строительных конструкций и изделий. Часть 4. Методы измерений и требования. – М.: Госстандарт, 2013. – 16 с.

Таблица 3. – Влияние доломитовой муки на плотность и прочность КГВ

Номер состава	Компонентный состав, % от массы гипсового вяжущего		Плотность, кг/м ³ , в возрасте 7 сут	Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 7 сут		Прочность на сжатие в возрасте 7 сут	
	портланд-цемент	доломитовая мука		МПа	%	МПа	%
контр.	–	–	1242	1,99	100	3,36	100
1	10	–	1331	2,69	135	5,22	155
2	10	5	1414	2,85	143	4,01	119
3	10	10	1498	2,69	135	4,49	133
4	10	20	1543	2,57	129	4,76	141

Установлено, что при содержании доломитовой муки в количестве 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего плотность увеличилась соответственно на 6; 12,5; 15,9%. При этом прочность на растяжение при изгибе (2,57–2,85 МПа) остается в пределах сопоставимых значений с прочностью гипсоцементного камня без доломитовой муки (2,69 МПа).

Для прочности на сжатие при добавлении доломитовой муки наблюдается тенденция к снижению значений по отношению к прочности на сжатие гипсоцементного камня без доломитовой муки. Однако в целом величина прочности на сжатие гипсоцементного камня с доломитовой мукой выше прочности гипсового камня контрольного состава на 19, 33, 41% при количестве доломитовой муки 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего соответственно.

Таким образом, введение доломитовой муки в состав композиционного гипсового вяжущего способствует формированию более плотной структуры и при компонентном составе КГВ (мас., %): гипс – 51,5; портландцемент – 5,2; доломитовая мука – 10,3; вода – 33; плотность в возрасте 7 сут выше на 19%, прочность на сжатие выше на 41%, прочность на растяжение при изгибе на 29% превышает прочность гипсового камня без минеральной добавки (см. таблицу 3, состав 4).

Исследование влияния золошлаковой смеси на свойства композиционного гипсового вяжущего.

Количество золошлаковой смеси принято равным 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего. Испытания проводились с использованием гипса строительного «Тайфун Мастер» № 35 марки Г5 Ш. Водогипсовое отношение соответствовало нормальной густоте и было принято постоянным для всех составов: В/Г = 0,6. Определение плотности и прочности КГВ проводилось по ГОСТ 23789²¹ путем испытания образцов-балочек 40×40×160 мм через 7 сут и после высушивания образцов до постоянной массы. Результаты исследований влияния золошлаковой смеси на плотность, водопоглощение и прочностные характеристики композиционного гипсового вяжущего представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Влияние золошлаковой смеси на плотность и прочность КГВ

Номер состава	Компонентный состав, % от массы гипсового вяжущего		Плотность, кг/м ³		Прочность на растяжение при изгибе, МПа (%)		Прочность на сжатие, МПа (%)		Водопоглощение, W _m , %	Общая пористость, %
	золошлаковая смесь	портланд-цемент	в возрасте 7 сут	сухих образцов	в возрасте 7 сут	сухих образцов	в возрасте 7 сут	сухих образцов		
контр.	–	–	2000	1648	2,43 (100)	4,54 (100)	4,40 (100)	8,12 (100)	–	–
1	–	10	1645	1348	3,24 (133)	4,60 (101)	4,02 (91)	10,66 (131)	29,0	0,49
2	5	10	1656	1375	2,93 (121)	4,97 (109)	4,41 (100)	10,30 (127)	22,6	0,48
3	10	10	1637	1387	2,72 (112)	5,00 (110)	4,99 (113)	10,02 (123)	23,7	0,48
4	20	10	1551	1406	2,80 (115)	5,29 (117)	4,34 (99)	10,30 (127)	21,8	0,47

При добавлении в состав КГВ золошлаковой смеси плотность сухих образцов уменьшилась: по сравнению с контрольным составом плотность сухих образцов была меньше на 17% при количестве золошлаковой смеси 5%, на 16% при количестве золошлаковой смеси 10% и на 15% при количестве золошлаковой смеси 20% от массы гипсового вяжущего.

²¹ ГОСТ 23789-2018 Вяжущие гипсовые. Методы испытаний. – М.: Госстандарт, 2019. – 18 с.

Анализ полученных результатов показывает, что при твердении в течение 7 сут в воздушно-сухих условиях введение в состав КГВ золошлаковой смеси приводит к снижению плотности гипсового камня на 17, 18, 22,5% при количестве 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего соответственно. При этом прочность на растяжение при изгибе увеличилась на 21% при количестве золошлаковой смеси 5% от массы гипсового вяжущего и при увеличении количества до 10 и 20% увеличилась соответственно на 12 и 15%. Прочность на сжатие КГВ при добавлении золошлаковой смеси в количестве 10% от массы гипсового вяжущего увеличилась на 13% по сравнению с контрольным составом. В количестве 5% от массы гипсового вяжущего золошлаковая смесь не оказала влияния на прочность на сжатие, она осталась на уровне контрольного образца. Увеличение количества золошлаковой смеси до 20% от массы гипсового вяжущего приводит к снижению прочности на сжатие на 14% по сравнению с составом, содержащим 10% золошлаковой смеси.

После высушивания при температуре 50 ± 5 °С прочность на растяжении при изгибе образцов с количеством золошлаковой смеси 5% от массы гипсового вяжущего увеличилась на 9% по сравнению с контрольным составом. С увеличением содержания золошлаковой смеси прочность на растяжении при изгибе составила 109, 110, 117% при количестве золошлаковой смеси 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего соответственно. Величина прочности на сжатие гипсоцементного камня с золошлаковой смесью выше прочности гипсового камня контрольного состава на 27, 23, 27% при количестве золошлаковой смеси 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего соответственно.

Включение в состав КГВ золошлаковой смеси приводит к уменьшению водопоглощения на 22, 18, 24% при количестве золошлаковой смеси 5, 10, 20% от массы гипсового вяжущего соответственно.

Изменение количества золошлаковой смеси в состав КГВ позволяет регулировать физико-механические свойства. При компонентном составе КГВ (мас., %): гипс – 53,8; портландцемент – 5,4; золошлаковая смесь – 10,8; вода – 30,1. Плотность в возрасте 7 сут ниже плотности гипсового камня на 22%; прочность на сжатие ниже на 1%; прочность на растяжение при изгибе на 15% превышает прочность гипсового камня без добавок; водопоглощение составило 21,8%, что на 25% ниже водопоглощения гипсоцементного вяжущего без добавки золошлаковой смеси.

Оптимизация состава композиционного гипсового вяжущего. Для подбора оптимального состава композиционного гипсового вяжущего применен метод математического планирования эксперимента на основе трехфакторного плана В-D13. В качестве варьируемых факторов принято содержание в составе КГВ, % от массы гипсового вяжущего: золошлаковой смеси (X1), доломитовой муки (X2), портландцемента (X3). После проведения предварительных исследований установлены уровни и интервалы варьирования факторов, которые составили для всех трех факторов: основной уровень (нулевой) – 10% от массы гипсового вяжущего, интервал варьирования – 5% от массы гипсового вяжущего. Для исключения влияния количества воды на свойства композиционного гипсового вяжущего, водогипсовое отношение сохранялось постоянным во всех составах и было равно $В/Г = 0,6$. Испытания проводились с использованием гипса строительного «Тайфун Мастер» № 35 марки Г5 III. План эксперимента в кодированных и натуральных значениях переменных представлен в таблице 5.

Таблица 5. – План эксперимента на основе трехфакторного плана В-D13

Номер опыта	Кодированные значения переменных			Натуральные значения переменных		
	X1	X2	X3	X1	X2	X3
1	-1	-1	-1	5	5	5
2	+1	-1	-1	15	5	5
3	-1	+1	-1	5	15	5
4	-1	-1	+1	5	5	5
5	-1	0,19	0,19	5	10,95	10,95
6	0,19	-1	0,19	10,95	5	10,95
7	0,19	0,19	-1	10,95	10,95	5
8	-0,29	+1	+1	8,55	15	15
9	+1	-0,29	+1	15	8,55	15
10	+1	+1	-0,29	15	15	8,55

Результаты испытания образцов-балочек $40 \times 40 \times 160$ мм, изготовленных по полученным комбинациям компонентов, позволили получить значения откликов, в качестве которых рассматривались следующие характеристики: предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа; предел прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$, МПа; плотность ρ , кг/м³; водопоглощение W_m , %; пористость $П_n$, %. Значения откликов определялось через 2 ч с момента затворения гипсового вяжущего водой, в возрасте 7 сут и для сухих образцов. Для каждой точки делали 3 замеса и результаты опытов усредняли. Полученные результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Значения откликов при комбинации компонентов КГВ по плану В-D13

Номер опыта	Предел прочности на сжатие $R_{сж}$, МПа, в возрасте			Предел прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$, МПа, в возрасте			Плотность ρ , кг/м ³			Водопоглощение W_m , %	Пористость, P_n , %
	2 ч	7 сут	в сухом состоянии	2 ч	7 сут	в сухом состоянии	2 ч	7 сут	в сухом состоянии		
1	4,22	5,14	10,0	2,35	2,56	3,27	1672	1594	1356	24,85	33,69
2	4,96	5,59	9,6	3,02	3,49	3,54	1708	1617	1367	23,62	32,49
3	4,55	4,91	9,6	2,68	2,73	3,35	1758	1590	1345	24,11	33,58
4	3,91	4,70	11,4	2,33	2,57	4,33	1754	1586	1410	21,47	29,91
5	5,04	5,42	11,1	2,48	3,00	4,31	1785	1648	1422	22,61	32,86
6	4,10	5,36	12,1	3,24	3,49	4,32	1768	1437	1391	23,10	33,08
7	5,20	4,58	12,6	2,51	2,8	5,21	1773	1629	1426	21,75	30,77
8	4,82	5,23	12,7	3,03	3,11	5,3	1762	1574	1438	19,89	30,49
9	3,99	6,12	11,3	2,23	3,87	4,87	1801	1555	1449	19,84	28,25
10	5,01	5,24	12,2	2,80	2,91	4,83	1789	1547	1468	20,03	29,45

В результате статической обработки опытных данных получены уравнения регрессии влияния рецептурных факторов (таблица 7).

Таблица 7. – Математические модели

Выходной параметр	Математические модели
Прочность на сжатие	2 ч $R_{сж2ч} = 4,986 + 0,344 \times x_2 - 0,295 \times x_3 - 0,413 \times x_2^2 - -0,129 \times x_3^2 - 0,027 \times x_1 \times x_2 - 0,371 \times x_1 \times x_3 + +0,211 \times x_2 \times x_3$ (1)
	7 сут $R_{сж7сут} = 5,211 + 0,22 \times x_1 - 0,109 \times x_2 + 0,265 \times x_3 + +0,397 \times x_1^2 - 0,309 \times x_3^2 - 0,247 \times x_1 \times x_2 + 0,241 \times x_1 \times x_3 + +0,247 \times x_2 \times x_3$ (2)
	в сухом состоянии $R_{сжсух} = 12,988 + 0,229 \times x_1 + 0,396 \times x_2 + 0,398 \times x_3 - -1,726 \times x_1^2 - 0,425 \times x_2^2 - 0,22 \times x_3^2 + 0,69 \times x_1 \times x_2 - 0,264 \times x_1 \times x_3$ (3)
Прочность на растяжение при изгибе	2 ч $R_{изг2ч} = 2,791 + 0,043 \times x_1 - 0,324 \times x_1^2 + 0,439 \times x_2^2 - 0,313 \times x_3^2 - -0,244 \times x_1 \times x_2 - 0,071 \times x_1 \times x_3 + +0,051 \times x_2 \times x_3$ (4)
	7 сут $R_{изг7сут} = 3,272 + 0,28 \times x_1 - 0,169 \times x_2 + 0,23 \times x_3 - -0,082 \times x_2^2 - 0,194 \times x_3^2 - 0,33 \times x_1 \times x_2 + 0,154 \times x_1 \times x_3 + +0,075 \times x_2 \times x_3$ (5)
	в сухом состоянии $R_{изгсух} = 5,192 + 0,259 \times x_1 + 0,34 \times x_2 + 0,338 \times x_3 - 0,729 \times x_1^2 - -0,599 \times x_2^2 + 0,221 \times x_3^2 + 0,311 \times x_1 \times x_2 - -0,194 \times x_1 \times x_3$ (6)
Плотность	2 ч $\rho_{2ч} = 1801,474 + 11,508 \times x_1 + 11,746 \times x_2 + 13,609 \times x_3 - -33,097 \times x_2^2 - 22,385 \times x_3^2 - 25,599 \times x_2 \times x_3$ (7)
	7 сут $\rho_{7сут} = 1554,205 - 28,951 \times x_1 + 17,91 \times x_2 - 20,91 \times x_3 + +60,534 \times x_1^2 - 88,7 \times x_2^2 + 52,005 \times x_3^2 - -44,513 \times x_1 \times x_3 + 26,815 \times x_2 \times x_3$ (8)
	в сухом состоянии $\rho_{сух} = 1436,141 + 16,788 \times x_1 + 16,772 \times x_2 + 19,962 \times x_3 - -35,118 \times x_2^2 + 23,814 \times x_1 \times x_2 - 13,428 \times x_1 \times x_3$ (9)
Водопоглощение	$W_m = 21,372 - 1,079 \times x_1 - 0,963 \times x_2 - 1,296 \times x_3 + 0,42 \times x_1^2 + 0,681 \times x_2^2 - 0,585 \times x_3^2 - 0,782 \times x_1 \times x_2 + +0,297 \times x_1 \times x_3$ (10)
Пористость	$P_n = 32,308 - 1,45 \times x_1 - 0,667 \times x_2 - 1,235 \times x_3 - -0,529 \times x_1^2 + +0,661 \times x_3^2 - 1,829 \times x_3^2 - 1,16 \times x_1 \times x_2 + 0,395 \times x_2 \times x_3$ (11)

Анализ коэффициентов уравнения регрессии для выходного параметра прочность на сжатие показывает, что совместное использование в составе КГВ всех трех компонентов способствует увеличению прочности на сжатие в сухом состоянии. Максимальное значение прочности на сжатие в сухом состоянии может быть получено при максимальном значении факторов (рисунок 1). Зафиксировав значение фактора $X_1 = 0$, очевиден рост прочности на сжатие при увеличении значений факторов X_2 и X_3 (рисунок 2). Фактор X_2 оказывает наибольшее влияние на прочность на сжатие при значении фактора $X_1 = -1$ и $X_1 = +1$, и наименьшее влияние при значении фактора $X_1 = 0$ (рисунок 3).

В ранний период твердения влияние компонентов не однозначно. Так, если в возрасте 2 ч золошлаковая смесь (X_1) является незначимым фактором, то в возрасте 7 сут и в сухом состоянии присутствие золошлаковой смеси способствует увеличению прочности на сжатие КГВ. С увеличением количества доломитовой муки (X_2) в возрасте 2 ч прочность на сжатие увеличивается, а в возрасте 7 сут – уменьшается. При увеличении количества портландцемента (X_3) в возрасте 2 ч происходит снижение прочности на сжатие, а в возрасте 7 сут портландцемент способствует росту прочности на сжатие (рисунок 4).

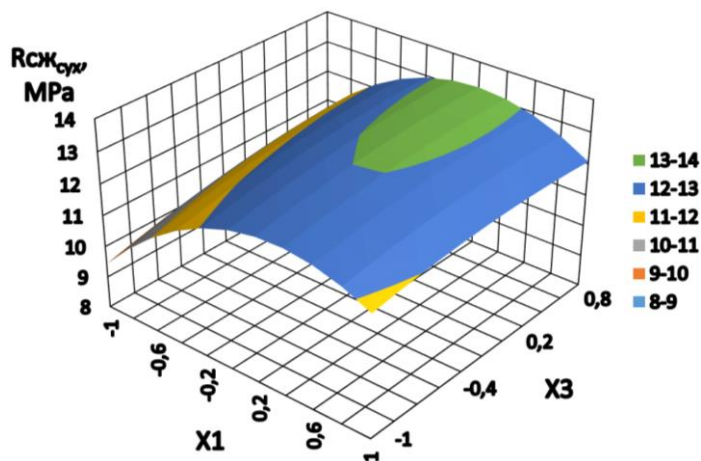


Рисунок 1. – Прочность КГВ на сжатие в сухом состоянии в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X3 (портландцемент) при значении фактора X2 (доломитовая мука) = +1

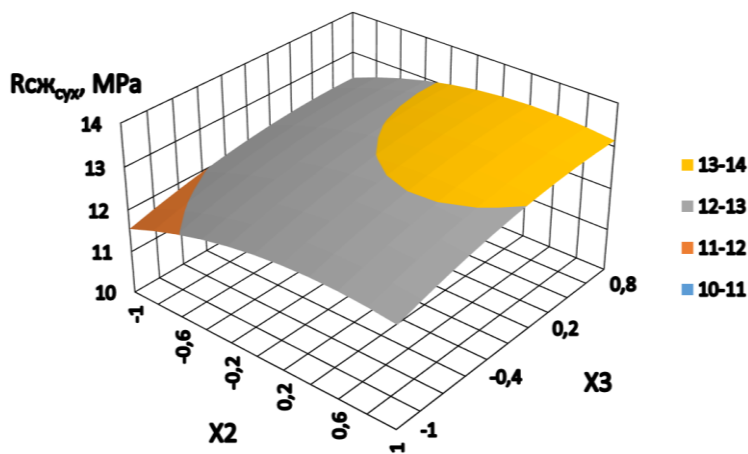


Рисунок 2. – Прочность КГВ на сжатие в сухом состоянии в зависимости от значений факторов X2 (доломитовая мука) и X3 (портландцемент) при значении фактора X1 (золошлаковая смесь) = 0

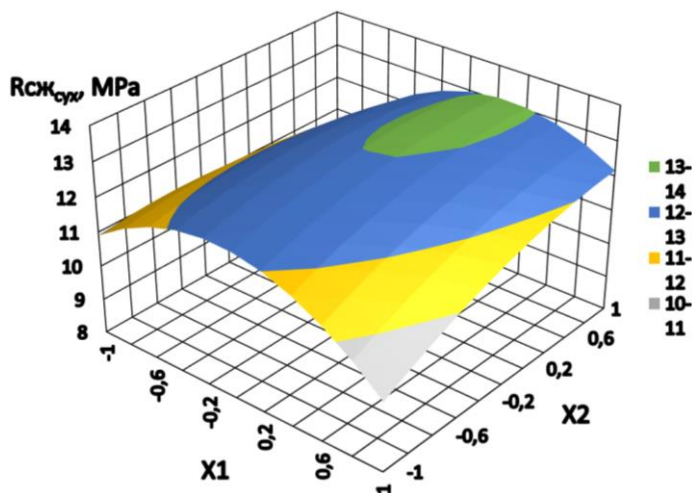


Рисунок 3. – Прочность КГВ на сжатие в сухом состоянии в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X2 (доломитовая мука) при значении фактора X3 (портландцемент) = 0

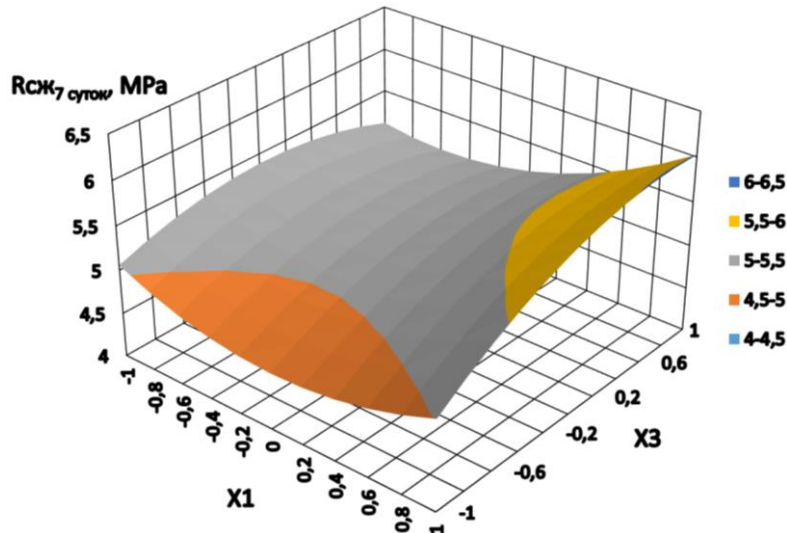


Рисунок 4. – Прочность КГВ на сжатие в возрасте 7 сут в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X3 (портландцемент) при значении фактора X2 (доломитовая мука) = 0

Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 2 ч подвержена параболическому влиянию факторов X1, X2, X3, на что указывает наличие значимых квадратичных эффектов в математической модели (4) и только одного основного эффекта фактора X1 (рисунок 5).

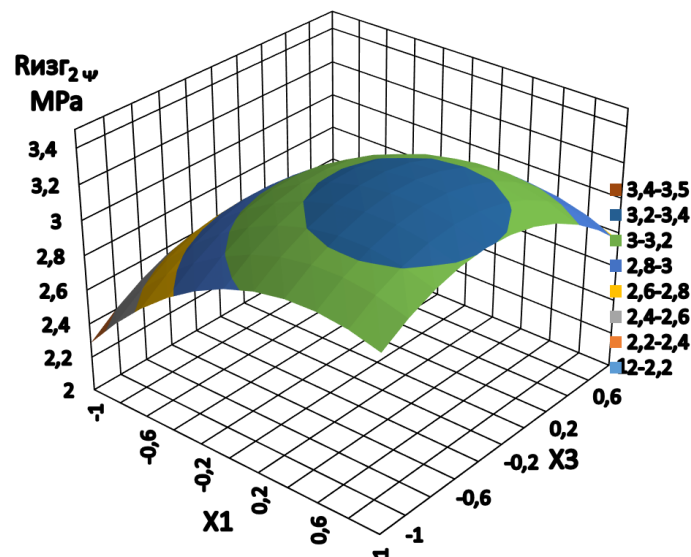


Рисунок 5. – Прочность КГВ на растяжение при изгибе в возрасте 2 ч в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X3 (портландцемент) при значении фактора X2 (доломитовая мука) = -1

В возрасте 7 сут преобладает линейное влияние факторов (рисунок 6), в сухом состоянии – параболическое влияние факторов на прочность КГВ на растяжение при изгибе, при этом максимальное значение прочности на растяжение при изгибе достигается при значении фактора X2 = 0 (рисунок 7).

На прочность на сжатие и прочность на растяжение при изгибе образцов в сухом состоянии наименьшее влияние оказывает золошлаковая смесь (X1), на что указывает меньшее значение линейного коэффициента фактора X1 в регрессионных моделях (3) и (6), соответственно, по сравнению со значениями линейных коэффициентов факторов X2 и X3.

Увеличение количества золошлаковой смеси, доломитовой муки и портландцемента в составе КГВ приводит к снижению водопоглощения и пористости, при этом содержание портландцемента (X3) в составе КГВ занимает первое место по влиянию на снижение водопоглощения (рисунок 8).

Факторы X1, X2, X3 оказывают влияние на плотность КГВ. С увеличением их количества плотность увеличивается, на что указывает положительное значение коэффициентов факторов в регрессионной модели (9).

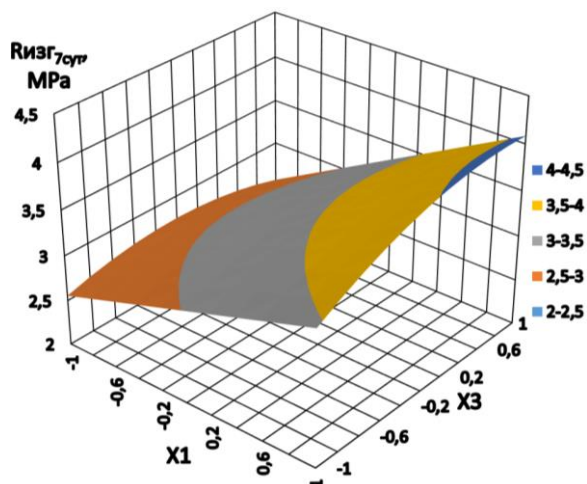


Рисунок 6. – Прочность КГВ на растяжение при изгибе в возрасте 7 сут в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X3 (портландцемент) при значении фактора X2 (доломитовая мука) = -1

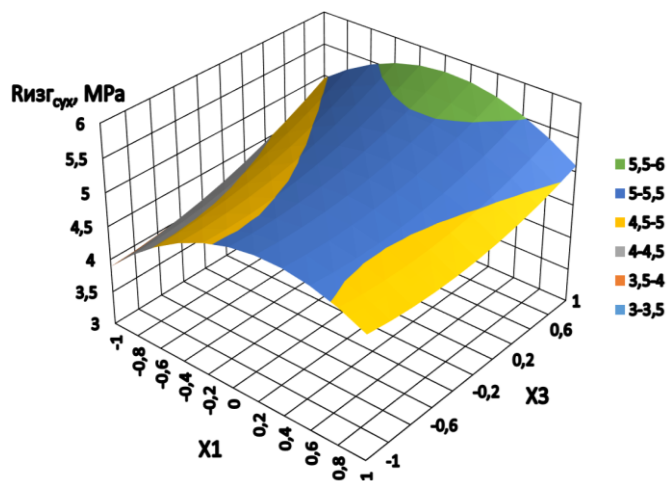


Рисунок 7. – Прочность КГВ на растяжение при изгибе в сухом состоянии в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X3 (портландцемент) при значении фактора X2 (доломитовая мука) = 0

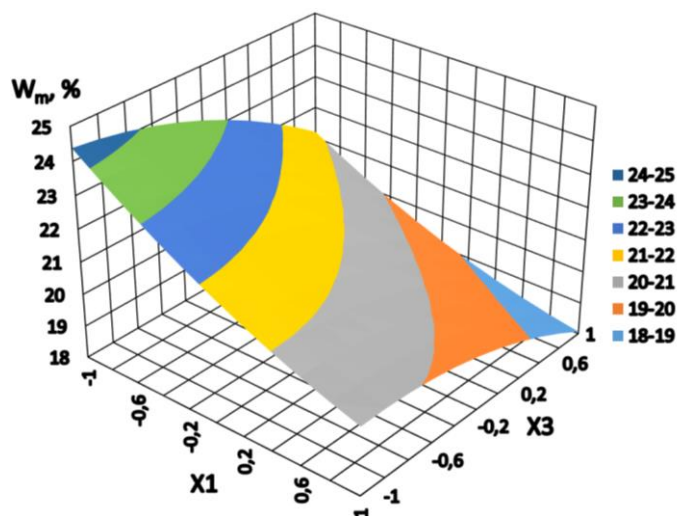


Рисунок 8. – Водопоглощение КГВ в зависимости от значений факторов X1 (золошлаковая смесь) и X3 (портландцемент) при значении фактора X2 (доломитовая мука) = +1

Полученные математические модели позволяют провести оптимизацию состава сырьевых компонентов КГВ и выявить закономерности их влияния на физико-механические свойства. Задавая один из интересующих параметров, можно определить состав и спрогнозировать физико-механические свойства КГВ.

Согласно полученным результатам КГВ имеет максимальное значение предела прочности на сжатие в сухом состоянии при постоянном значении фактора $X_3 = +1$. Поверхность отклика в трехмерной системе координат функции предела прочности на сжатие в сухом состоянии $R_{сж,сух}$, МПа, представлена на рисунке 9.

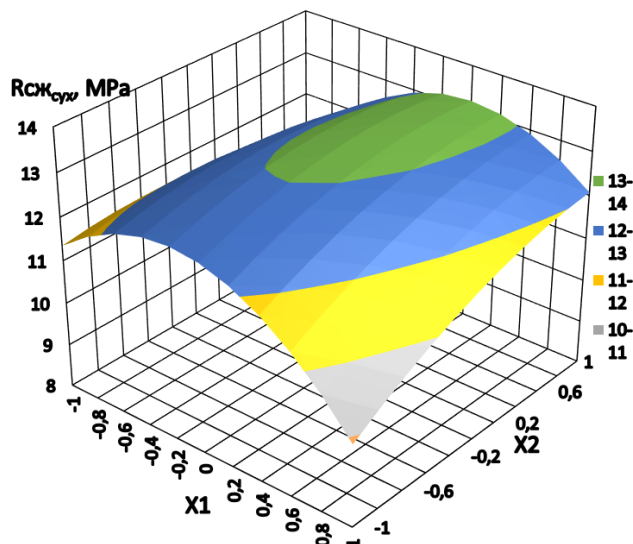


Рисунок 9. – Прочность КГВ на сжатие в сухом состоянии в зависимости от значений факторов X_1 (золашлаковая смесь) и X_2 (доломитовая мука) при значении фактора X_3 (портландцемент) = +1

Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов: $x_1 = -0,091$; $x_2 = 0,335$; $x_3 = 1$. Значение экстремума составляет $R_{сж,сух} = 13,22$ МПа. Компонентный состав КГВ, обеспечивающий получение гипсобетона с максимальной прочностью на сжатие в сухом состоянии (мас., %): гипс строительный – 51; золашлаковая смесь – 4,9; доломитовая мука – 6; портландцемент – 7,6; вода – 30,6.

Физико-механические характеристики гипсобетона на основе КГВ. Для экспериментального определения характеристик гипсобетона были изготовлены образцы-кубики $70 \times 70 \times 70$ мм. Образцы набирали прочность в воздушно-сухих условиях при температуре 20°C . Определение характеристик гипсобетона проводилось в возрасте 7 сут, после высушивания образцов до постоянной массы и в водонасыщенном состоянии. Полученные результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8. – Физико-механические характеристики гипсобетона на основе оптимизированного состава КГВ

Номер образца	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$		Прочность на сжатие, МПа			Коэффициент размягчения	Водопоглощение, %	Пористость, %
	в возрасте 7 сут	в сухом состоянии	в возрасте 7 сут	в сухом состоянии	насыщенных водой			
1	1499	1405	8,76	12,87	5,27	0,41	23,17	47
2	1487	1431	9,91	13,41	6,21	0,46	23,77	46
3	1501	1434	10,11	13,61	6,78	0,46	23,60	45
среднее значение	1496	1423	9,59	13,30	6,09	0,44	23,51	46

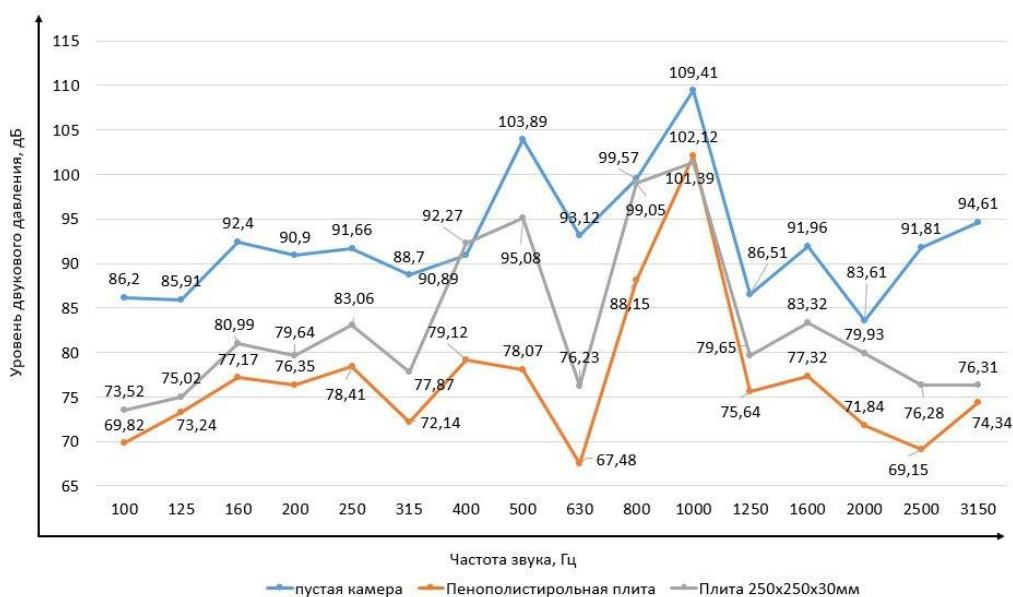
Результаты экспериментальных испытаний показали, что прочность на сжатие гипсобетона в сухом состоянии составила $R_{сж,сух} = 13,30$ МПа, при расчетном значении $R_{сж,сух} = 13,22$ МПа, что указывает на высокую сходимость с результатом расчета и подтверждает достоверность полученной математической модели. На основе оптимизированного состава сырьевой смеси КГВ получен гипсобетон плотностью $1423 \text{ кг}/\text{м}^3$, прочностью на сжатие $13,3$ МПа, коэффициентом размягчения $0,44$, водопоглощением $23,5\%$, пористостью 46% .

Теплопроводность и звукоизоляционные свойства гипсобетона на основе КГВ. Для проведения исследований по определению теплопроводности и звукоизоляционных свойств по СТБ 1618-2006²² были изготовлены и высушены до постоянной массы образцы-плиты размером $250 \times 250 \times 30$ мм. Коэффициент теплопроводности измеряли на приборе ИТП-МГ4. Измерения показали, что коэффициент теплопроводности составляет $0,2898 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

²² СТБ 1618-200 6 Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме. – М.: Минстройархитектура, 2006. – 12 с.

Звукоизоляционные свойства определялись с помощью учебной акустической камеры. Измерения проводились по уровням звукового давления в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500 и 3150 Гц в соответствии с СН 2.04.01.2020²³.

На первом этапе были выполнены измерения уровня звукового давления в пустой акустической камере («излучающем» отсеке). На следующем этапе акустическая камера разделялась на два отсека перегородкой из пенополистирола, в окно перегородки устанавливался исследуемый образец гипсобетона. Далее выполнялось изменение частоты и фиксировался уровень звукового давления в отсеке, отделенном от источника звукового сигнала перегородкой с исследуемым материалом («принимающем» отсеке). Эффективность звукоизоляционных свойств материала оценивалась по показателю снижения уровня звукового давления в «принимающем» отсеке по сравнению с уровнем звукового давления с «излучающим» отсеке. Результаты измерения звукоизоляционных свойств представлены на рисунке 10.



1 – без панели; 2 – с панелью из гипсобетона;
3 – с панелью из экструдированного пенополистирола

Рисунок 10. – Зависимость уровня звукового давления от частоты в камере

Анализ полученных результатов показывает, что гипсобетонная перегородка, изготовленная из КГВ, толщиной 30 мм, в диапазоне частот 100 до 300 Гц обеспечивает снижение уровня шума до 12,7 дБ.

Заключение. Таким образом, включение в состав КГВ портландцемента, золошлаковых отходов и доломитовой муки позволяет регулировать реологические и физико-механические свойства. Установлено, что портландцемент в составе КГВ приводит к увеличению прочности, доломитовая мука способствует уплотнению структуры, золошлаковая смесь снижает плотность без снижения прочности.

Выполненные с использованием метода математического планирования эксперимента исследования физико-механических свойств КГВ показали совместимость сырьевых компонентов и возможность получения гипсобетонов с заданными свойствами путем подбора содержания компонентов на основе разработанных математических моделей. Отмечено, что, изменяя содержание золошлаковой смеси, доломитовой муки, портландцемента в составе КГВ, можно изменять физико-механические характеристики: прочность на сжатие от 9,4 МПа до 13,2 МПа, прочность на растяжение при изгибе от 3,2 МПа до 5,7 МПа, плотность от 1345 кг/м³ до 1468 кг/м³, водопоглощение от 18,2% до 24,4%.

На основе полученных математических моделей разработан состав композиционного гипсового вяжущего (мас., %): гипс строительный – 51; золошлаковая смесь – 4,9; доломитовая мука – 6; портландцемент – 7,6; вода – 30,6, который позволяет получить гипсобетон плотностью 1423 кг/м³, прочностью на сжатие 13,3 МПа, водопоглощением 23,5%, коэффициентом размягчения 0,44, коэффициентом теплопроводности 0,2898 Вт/(м·°С). Разработанный состав сырьевой смеси КГВ может быть рекомендован для изготовления стеновых блоков для эксплуатации в зданиях с относительной влажностью воздуха не более 60%.

²³ СН 2.04.01.2020 Защита от шума. – Минск: Минстрой архитектуры, 2020. – 52 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества: учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1986. – 463 с.
2. Башкатов Н.Н. Минеральные воздушные вяжущие вещества: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 148 с.
3. Effective composites employing fast-hardening gypsum cement binders for additive manufacturing / N.V. Chernysheva, V.S. Lesovik, E.S. Glagolev et al. // *Advances in Engineering Research (Actual Issues of Mechanical Engineering AIME 2017)*. – 2017. – Vol. 133. – P. 135–141. DOI: 10.2991/aime-17.2017.23.
4. Муразаев С.-А.Ю., Чернышева Н.В., Аласханов С.Х. Использование золошлаковых смесей ТЭЦ для производства композиционных гипсовых вяжущих // *Экология и промышленность России*. – 2013. – № 7. – С. 26–29. DOI: 10.18412/1816-0395-2013-7-26-29.
5. Халиуллин М.И., Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р. Состав и структура камня композиционного гипсового вяжущего с добавками извести и молотой керамзитовой пыли // *Вестн. МГСУ*. – 2013. – № 12. – С. 109–117. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.12.109-117.
6. Глаголев Е.С., Воронов В.В. Композиционное вяжущее с использованием опоковидного мергеля и пенобетонных смесей для монолитного строительства // *Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2018. – № 8. – С. 109–116. DOI: 10.12737/article_5b6d586da74f79.11389696.
7. Prospects for effective use of dolomite in concrete compositions / V. Vaganov, A. Kireev, S. Avdeev et al. // *Constuction Science*. – 2016. – Vol. 19. – P. 27–32. DOI: 10.1515/CONS-2016-0008.
8. Парфенова Л.М., Разуева Е.А. Кинетика твердения золошлакощелочного вяжущего // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Стр-во. Приклад. науки*. – 2019. – № 16. – С. 35–40.

REFERENCES

1. Volzhenskii, A.V. (1986). *Mineral'nye vyazhushchie veshchestva*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
2. Bashkatov, N.N. (2018). *Mineral'nye vozdushnye vyazhushchie veshchestva*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta. (In Russ.).
3. Chernysheva, N.V., Lesovik, V.S., Glagolev, E.S. & Volodchenko, A.A. (2017). Effective composites employing fast-hardening gypsum cement binders for additive manufacturing. *Advances in Engineering Research (Actual Issues of Mechanical Engineering AIME 2017)*, (133), 135–141. DOI: 10.2991/aime-17.2017.23.
4. Murtazaev, S.-A.Yu., Chernysheva, N.V. & Alaskhanov, A.N. (2013). Usage of bottom ashes mixtures of CHP for manufacturing of composite gypsum binders (CGB). *Ecology and Industry of Russia*, (7), 26–29. DOI: 10.18412/1816-0395-2013-7-26-29. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Khaliullin, M.I., Rakhimov, R.Z. & Gaifullin, A.R. (2013). Sostav i struktura kamnya kompozitsionnogo gipsovogo vyazhushchego s dobavkami izvesti i molotoi keramzitovoi pyli [Composition and structure of the stone composite gypsum binder with additives of lime and the ground haydite dust]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, (12), 109–117. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.12.109-117. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Glagolev, E.S. & Voronov, V.V. (2018). Kompozitsionnoe vyazhushchee s ispol'zovaniem opokovidnogo mergelya i penobetonnykh smesei dlya monolitnogo stroitel'stva [Composite bonding with the use of the overcape mergel and foam concrete mixtures for monolithic construction]. *Vestn. BGTU im. V.G. Shukhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]*, (8), 109–116. DOI: 10.12737/article_5b6d586da74f79.11389696. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Vaganov, V., Kireev, A., Avdeev, S., Šahmenko, G. & Šinka, M. (2016). Prospects for effective use of dolomite in concrete compositions. *Constuction Science*, (19), 27–32. DOI.ORG/10.1515/CONS-2016-0008.
8. Parfenova, L.M. & Razueva, E.A. (2019). Kinetika tverdeniya zoloshlakoshchelochnogo vyazhushchego [Hardeningkinetics of alkali activated ash and slag binder]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, (16), 35–40. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 13.12.2023

COMPOSITE GYPSUM BINDER USING DOLOMITE FLOUR AND ASH AND SLAG WASTE

M. TOLMACH, N. RASCHINSKY, L. PARFENOVA
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article presents the results of studies of the physical and mechanical properties of a composite gypsum binder containing ash and slag mixture, dolomite flour and portland cement. Mathematical models of the influence of recipe factors on the basic physical and mechanical properties of CGB, compressive strength, tensile strength in bending, density, water absorption and porosity have been obtained, allowing to optimize the composition of the raw materials of the composite gypsum binder. It has been shown that by changing the content of prescription factors in the composition of the CGB, it is possible to vary the physical and mechanical characteristics: compressive strength in the range from 9,4 MPa to 13,2 MPa, tensile strength in bending – from 3,2 MPa to 5,7 MPa, density – from 1345 kg/m³ to 1468 kg/m³, water absorption – from 18,2% to 24,4%. Based on the optimized composition of the CGB raw material mixture, gypsum concrete with a compressive strength of 13,3 MPa and a softening coefficient of 0,44 was obtained, which can be used for the manufacture of wall blocks.

Keywords: composite gypsum binder, ash and slag waste, dolomite flour, composition optimization, physical and mechanical properties, gypsum concrete.