

УДК 519.252
DOI

CC BY 4.0

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТВОРНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Местников А. Е. ORCID ID 0000-0003-4522-0296, Егорова А. Д., Егоров П. Т.

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова», Якутск,
Российская Федерация, e-mail: mestnikovae@mail.ru*

В условиях холодного климата и вечной мерзлоты актуален рациональный подбор составов бетонных смесей, твердеющих при отрицательных температурах. Целью работы является прогнозирование физико-механических характеристик растворных смесей, состоящих из портландцемента и комплексного модификатора, обладающих упрочняющей и расширяющей способностью, для обеспечения надежного скрепления поверхности железобетонных свай с мерзлым грунтом. Комплексный модификатор в своем составе имеет два минеральных компонента: гипс и горелую породу. В подборе составов расширяющейся цементной композиции, твердеющей в условиях отрицательной температуры грунта, использовали математическое планирование эксперимента, позволяющее установить количество и параметры проведения экспериментов для получения достоверных результатов с достаточной точностью. В качестве переменных параметров приняты содержание добавки в цементной композиции и горелой породы в комплексном модификаторе. Результаты экспериментальных исследований и математического моделирования позволили установить характер влияния комплексного модификатора на основе горелых пород и гипса на физико-механические характеристики цементного камня. На основе геометрической поверхности отклика имеется реальная возможность предсказать прочностные характеристики исследуемых образцов через 28 суток твердения, что значительно сокращает продолжительность исследования. Результаты определения линейного расширения опытных образцов показывают, что их значения на 3-е сутки не превосходят 0,1 %, что позволяет считать, что цементные композиции с комплексным модификатором на основе горелых пород и гипса относятся к расширяющимся цементам, а песчано-цементные растворы на их основе пригодны для заполнения пустот между железобетонной свайей и мерзлым грунтом.

Ключевые слова: математическое планирование эксперимента, переменные параметры, портландцемент, расширяющая добавка, оптимизация, состав, растворные смеси, вечная мерзлота

PREDICTION OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MORTAR MIXTURES FOR CONSTRUCTION WORK IN PERMAFROST CONDITIONS

Mestnikov A. E. ORCID ID 0000-0003-4522-0296, Egorova A. D., Egorov P. T.

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov”,
Yakutsk, Russian Federation, e-mail: mestnikovae@mail.ru*

In cold climates and permafrost conditions, it is important to choose the right concrete mix composition that can harden at low temperatures. The goal of this research is to predict the physical and mechanical properties of mortar mixtures consisting of Portland cement and a complex modifier that has both strengthening and expanding properties, in order to ensure reliable bonding between the surface of reinforced concrete piles and frozen soil. The complex modifier contains two mineral components: gypsum and burnt rock. In the selection of compositions of the expanding cement composition, hardening in conditions of negative temperature of the soil, used mathematical planning of the experiment, allowing to establish the number and parameters of conducting experiments to obtain reliable results with sufficient accuracy. As variable parameters adopted: the content of the additive in the cement composition and burnt rock in the complex modifier. The results of experimental studies and mathematical modeling have allowed us to determine the effect of the complex modifier based on burnt rocks and gypsum on the physical and mechanical properties of the cement stone. Based on the geometric response surface, it is possible to predict the strength characteristics of the samples after 28 days of curing, which significantly reduces the duration of the study. The results of determining the linear expansion of the test samples show that their values do not exceed 0.1% on the third day, which allows us to consider that cement compositions with a complex modifier based on burnt rocks and gypsum are expanding cements, and sand-cement mortars based on them are suitable for filling the voids between a reinforced concrete pile and frozen soil.

Keywords: mathematical experiment planning, variable parameters, Portland cement, expanding additive, optimization, composition, mortar mixtures, permafrost

Введение

В любых климатических условиях создание новых бетонных композитов связано с разработкой эффективных строительных

материалов, отвечающих требованиям технико-экономической целесообразности [1–3]. В условиях холодного климата и вечной мерзлоты арктических регионов Российской

Федерации актуальным является рациональный подбор составов бетонных смесей, твердеющих при отрицательных температурах, для зимнего бетонирования строительных конструкций в условиях строительной площадки [4–6]. Зимнее бетонирование строительных конструкций в условиях открытой строительной площадки, как правило, проводится в зимний период при температурах не ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7, 8]. А устройство свайных фундаментов в условиях вечномерзлых грунтов производится круглогодично с температурой $-2\text{...}-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9–11].

Для управления структурой и свойствами бетонов для зимнего бетонирования применяют широкий выбор химических, минеральных нано- и микроразмерных, многокомпонентных и противоморозных модифицирующих добавок, а также множество методов прогрева бетона.

В условиях Республики Саха (Якутия) преимущественно применяются свайные фундаменты, в частности буроопускные висячие сваи. Технология устройства фундамента в условиях вечной мерзлоты с применением железобетонных свай заводского изготовления заключается в том, что свая погружается в предварительно пробуренные скважины, диаметр которых превышает (на 5 см и более) наибольший размер поперечного сечения сваи, с заполнением скважины грунтовым раствором. По российским стандартам (СП 45.13330.2017 «Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87») в качестве исходных смесей предлагается использовать песчано-известковый, песчано-глинистый и песчано-цементный растворы. В отличие от бетонных смесей для зимнего бетонирования, при устройстве висячих свай в вечномерзлых грунтах, используемых по принципу I, применение химических добавок в растворах, понижающих температуру замерзания, а также различных способов прогрева бетона не допускается. В основном для заполнения пазух свай применяются песчано-цементные растворы, составы которых принимаются по условиям обеспечения заданной прочности смерзания сваи с грунтом и остаются практически неизменными [9, 10]. В тех же

задачах для заполнения затрубного пространства эксплуатационных колонн газовых и нефтяных скважин применяются тампонажные смеси на основе цементов с расширяющими добавками [11–13]. Такие смеси предназначаются для заполнения трещин и пустот с целью закрепления неустойчивых, дробленых горных пород в скважинах для установки свай, а также металлических труб для добычи газа и нефти.

Представляется, что для обеспечения надежного скрепления поверхности железобетонных свай с мерзлым грунтом в условиях вечной мерзлоты при заполнении пазух свай необходимо использовать растворные смеси на основе цементного вяжущего с добавкой комплексного модификатора с упрочняющей и расширяющей способностью.

Цель исследования – прогнозирование физико-механических характеристик растворных смесей, состоящих из портландцемента и комплексного модификатора, обладающего упрочняющей и расширяющей способностью, для обеспечения надежного скрепления поверхности железобетонных свай с мерзлым грунтом.

Материалы и методы исследования

В качестве компонента комплексного модификатора был проведен отбор проб горелых пород месторождений из Горного района Республики Саха (Якутия): образцы красноватого 1 и светло-серого 2 цвета, отличающиеся разной степенью обжига. Результаты химического анализа, проведенного в Центре коллективного пользования СВФУ, приведены в табл. 1.

Частично эти горелые породы использовали в дорожном строительстве. Известно, что горелые породы могут быть использованы в качестве инертных заполнителей для бетонов, а также в качестве активных минеральных добавок в составе композиционных вяжущих веществ совместно с гипсом и известью. Для использования в качестве компонента комплексного модификатора горелые породы подвергались механической активации путем помола в шаровой мельнице RETSCH PM400. Тонкость помола минерального компонента была доведена до уровня $350\text{--}400\text{ м}^2/\text{кг}$.

Таблица 1

Химический состав горелых пород

№	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	O ₂ , общ.	O ₂
1	65,05	0,77	16,62	6,06	< 0,25	0,07	1,80	2,45	2,92	3,16	0,18	0,65	< 0,20
2	67,40	1,19	24,80	1,00	< 0,25	0,02	0,10	0,51	0,84	0,13	0,08	< 0,25	< 0,20

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В качестве вяжущего вещества применяли портландцемент ЦЕМ I 32,5 Б. Гипс использовали как сульфатный компонент, способствующий расширению цементного камня. В работе использовали стандартные и современные физико-химические методы исследования структуры и свойств исходных смесей и испытуемых материалов.

В подборе составов расширяющейся растворной смеси, твердеющей в условиях отрицательной температуры грунта, использовали математическое планирование эксперимента, позволяющее установить количество и параметры проведения экспериментов для получения достоверных результатов с достаточной точностью [14].

Результаты исследования и их обсуждение

В решении инженерных задач материаловедческого характера используются математические модели исследования, представляющие уравнения, связывающие переменные параметры с факторами, иначе, так называемая функция отклика $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$. Функции отклика лучше рассматриваются в виде геометрического аналога – поверхности отклика. В качестве математических моделей наиболее часто используются полиномы 1, 2, 3-й степени.

Для получения математической модели нами последовательно были выполнены следующие этапы: определены объект исследования, переменные параметры, факторы, интервалы и уровни варьирования; выбраны квадратичная зависимость и полином 2-й степени для построения модели; составлена матрица планирования для про-

ведения эксперимента; проведен цикл экспериментов, число возможных опытов определяется выражением $N = p^k = 3^3 = 9$, где N – число опытов, p – число уровней, k – число факторов, (табл. 2); математическая обработка эксперимента, которая позволила найти коэффициенты регрессии для составления математической модели; проверка адекватности модели.

Переменные факторы при планировании эксперимента обозначены: X_1 – содержание добавки в цементной смеси, % мас.; X_2 – содержание горелой породы в добавке, % мас. Параметры оптимизации комплексного модификатора: Y_1 – нормальная плотность цементного теста, %; Y_2 – начало схватывания; Y_3 – конец схватывания; Y_4 – тонкость помола; Y_5 – линейное расширение; Y_6 – прочность при сжатии; Y_7 – водонепроницаемость.

Комплексный модификатор в своем составе имеет два минеральных компонента: гипс и горелую породу. Впервые рабочая гипотеза о возможности применения горелой породы и гипса в составе комплексного модификатора с упрочняющей и расширяющейся способностью была озвучена в наших ранних исследованиях [15]. Визуально горелую породу можно разделить на два цвета: красноватый и светло-серый.

Гипсовое вяжущее, тонкомолотая горелая порода и портландцемент тщательно перемешивались в скоростном лабораторном смесителе до получения однородной сухой смеси. Были изготовлены два состава разных исходных смесей с двумя пробами горелых пород: а) красноватая горелая порода + гипс; б) светло-серая горелая порода + гипс (табл. 1).

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента для проведения эксперимента

№	X_1	X_2	X_0	X_1^2	X_2^2	X_1X_2	X_1	X_2
1	-1	-1	1	1	1	1	10	40
2	0	-1	1	0	1	0	15	40
3	+1	-1	1	1	1	-1	20	40
4	-1	0	1	1	0	0	10	50
5	0	0	1	0	0	0	15	50
6	+1	0	1	1	0	0	20	50
7	-1	+1	1	1	1	-1	10	60
8	0	+1	1	0	1	0	15	60
9	+1	+1	1	1	1	1	20	60
	(01) = 0	(02) = 0	(00) = 9	(11) = 6	(22) = 6	(12) = 0		

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Испытания образцов разрушением на гидравлическом прессе на сжатие и изгиб производились после 14 суток естественного хранения. В этом возрасте бетонные образцы по требованиям ГОСТ должны обладать прочностью на сжатие 75 % от прочности в 28 суток. Полученные результаты экспериментов позволили получить уравнения зависимости активности цементной композиции от переменных факторов:

$$Y_1 = 69,41 - 24,39x_1 + 12,57x_2 + 29,51x_1^2 - 12,73x_2^2 - 2,33x_1x_2, \quad (1)$$

$$Y_1 = 82,95 - 15,43x_1 - 4,699x_2 + 19,56x_1^2 - 4,3x_2^2 - 29,59x_1x_2. \quad (2)$$

Поверхность отклика для уравнения (1) показана на рис. 1, а. Она позволяет установить активность цементной композиции первого состава. Активность цементной композиции второго состава показана поверхностью отклика уравнения (2), приведенной на рис. 1, б.

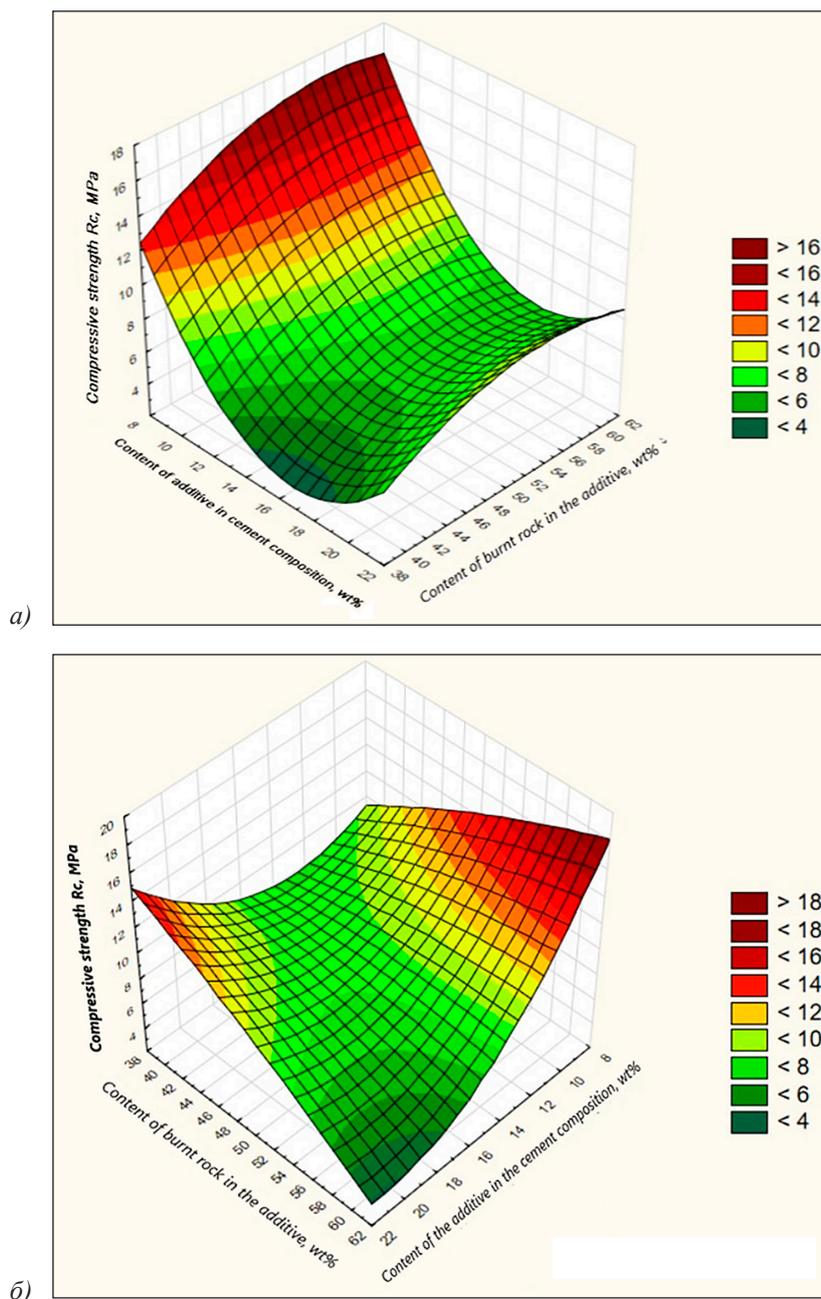


Рис. 1. Активность составов цементной смеси с комплексным модификатором:
 а – красная горелая порода + гипс; б – белая горелая порода + гипс
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

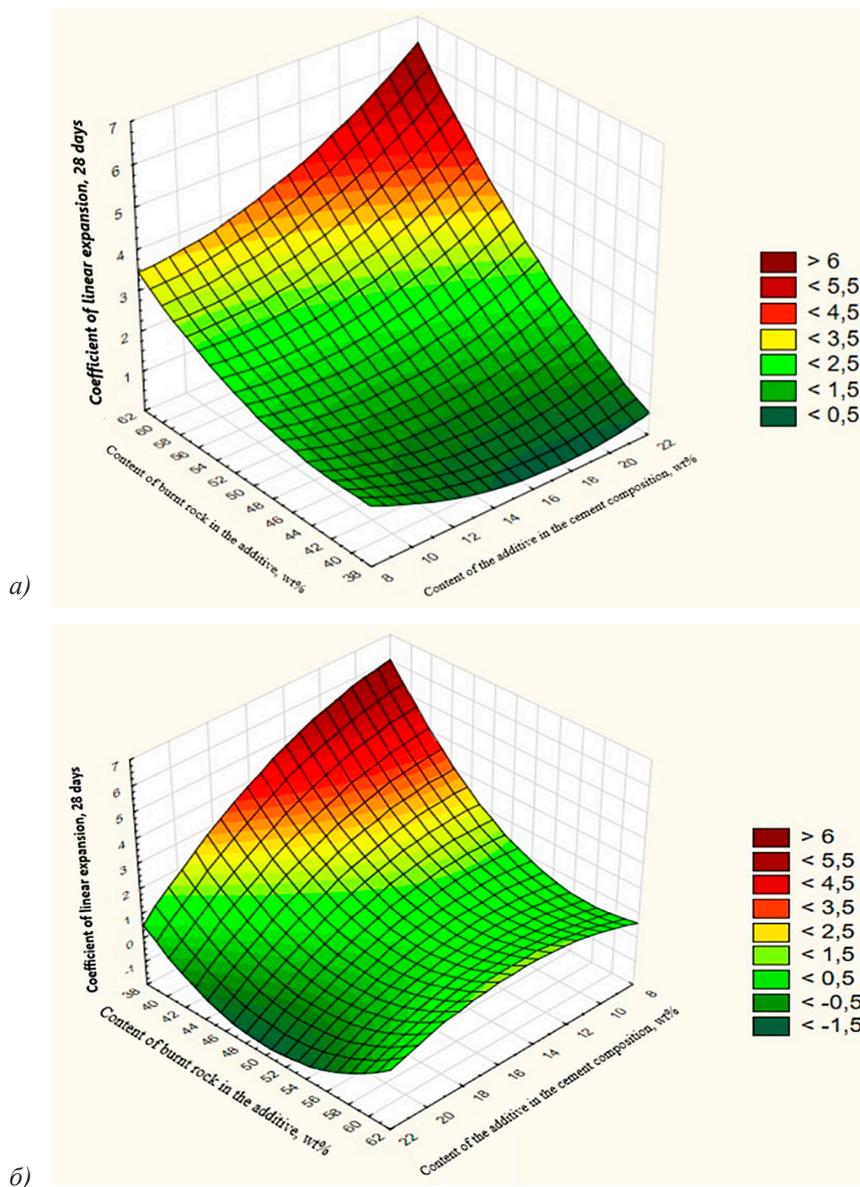


Рис. 2. Линейное расширение образцов на основе цементной композиции с комплексным модификатором: а – красноватая горелая порода + гипс после 28 суток твердения; б – светло-серая горелая порода + гипс после 28 суток твердения
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

На основе геометрической поверхности отклика рис. 1 имеется реальная возможность предсказать прочностные характеристики исследуемых образцов через 28 суток твердения. Установлено, что прочность на сжатие цементного камня первого состава (рис. 1, а) будет равна 17,1 МПа, второго состава – 17,9 МПа. Отмечено, что снижение активности цементной композиции первого состава связано с увеличением количества комплексного модификатора в целом и, в частности, уменьшением количества красноватой горелой породы, то есть повышением количества гипса. Обратное

явление наблюдается у цементной смеси второго состава, где с увеличением количества гипса в комплексном модификаторе прочностные показатели цементного камня возрастают.

Влияние состава исходной цементной композиции на коэффициент линейного расширения бетонных образцов (ГОСТ 11052-74).

На бетонных образцах размерами 40×40×160 мм были нанесены рэперы. Наблюдения за изменениями геометрических размеров производились в 1, 3, 7, 21 и 28 суток. На основе экспериментальных результатов, полученных на основе

первого состава цементной композиции, были определены коэффициенты регрессии и составлены математические модели (уравнения (3)–(7)) для опытных образцов в возрасте 1, 3, 7, 21, 28 суток:

$$Y_2 = 1,33 + 0,387x_1 + 1,525x_2 + 0,328x_1^2 + 0,365x_2^2 + 0,483x_1x_2, \quad (3)$$

$$Y_2 = 1,721 + 0,391x_1 + 1,559x_2 + 0,189x_1^2 + 0,292x_2^2 + 0,48x_1x_2, \quad (4)$$

$$Y_2 = 1,407 + 0,122x_1 + 1,809x_2 + 0,311x_1^2 + 0,477x_2^2 + 0,661x_1x_2, \quad (5)$$

$$Y_2 = 1,7 + 0,34x_1 + 2,012x_2 + 0,556x_1^2 + 0,157x_2^2 + 0,797x_1x_2, \quad (6)$$

$$Y_2 = 1,733 + 0,353x_1 + 1,616x_2 + 0,315x_1^2 + 0,424x_2^2 + 0,576x_1x_2. \quad (7)$$

Прогнозирование линейного расширения опытных образцов, изготовленных на основе первого состава цементной композиции, через 28 суток производится на основе поверхности отклика, изображенной на рис. 2, а. Такие же опыты повторили для образцов на основе второго состава цементной смеси.

На основе экспериментальных результатов, полученных на основе второго состава цементной смеси, были определены коэффициенты регрессии и составлены математические модели (уравнения (8)–(12)) для опытных образцов в возрасте 1, 3, 7, 21, 28 суток:

$$Y_2 = 1,13 - 0,779x_1 - 1,054x_2 - 0,663x_1^2 + 1,174x_2^2 + 0,877x_1x_2, \quad (8)$$

$$Y_2 = 1,348 - 1,066x_1 - 1,554x_2 - 1,252x_1^2 + 1,736x_2^2 + 0,8044x_1x_2, \quad (9)$$

$$Y_2 = 1,094 - 1,074x_1 - 1,106x_2 - 0,624x_1^2 + 1,497x_2^2 + 0,838x_1x_2, \quad (10)$$

$$Y_2 = 0,753 - 1,054x_1 - 1,126x_2 - 0,352x_1^2 + 1,702x_2^2 + 0,879x_1x_2, \quad (11)$$

$$Y_2 = 0,8001 - 1,017x_1 - 1,15x_2 - 0,5111x_1^2 + 1,4558x_2^2 - 0,798x_1x_2. \quad (12)$$

Таблица 3

Состав 1 м³ мелкозернистого бетона (МЗБ)

Раствор	Цемент, кг	Расширяющая добавка		Песок воздушно-сухой, кг	Вода, л
		Гипс, кг	Горелая порода, кг		
МЗБ-1	360	24	16	830	410
МЗБ-2	400	27	18	830	410

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Установление значения линейного расширения опытных образцов, изготовленных на основе второго состава цементной композиции, через 28 суток производится на основе поверхности отклика, изображенной на рис. 2б.

Результаты испытаний на определение влияния составов цементной композиции на линейные расширения опытных образцов показывают, что их значения на 3-и сутки не превосходят 0,1 %. Это обстоятельство позволяет считать, что цементные композиции с комплексным модификатором на основе горелых пород и гипса относятся к расширяющимся цементам.

Для практической апробации разработанного состава расширяющегося цемента был приготовлен мелкозернистый бетон двух составов на его основе и речного песка. Состав мелкозернистого бетона представлен в табл. 3.

Прочностные характеристики образцов бетона были определены после 14 и 28 суток хранения во влажном грунте. Полученные показатели прочности мелкозернистого бетона с маркой по прочности М100 позволяют отнести использованную песчано-цементную смесь к растворам, пригодных для заполнения пустот между железобетонной свайей и мерзлым грунтом в скважинах в условиях многолетнемерзлых грунтов.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований и математического моделирования позволили установить характер влияния комплексного модификатора на основе горелых пород и гипса на физико-механические характеристики цементного камня.

Результаты определения линейного расширения опытных образцов показывают, что их значения на 3-и сутки не превосходят

0,1 %, что позволяет считать, что цементные композиции с комплексным модификатором на основе горелых пород и гипса относятся к расширяющимся цементам, а песчано-цементные растворы на их основе пригодны для заполнения пустот между железобетонной свай и мерзлым грунтом.

Список литературы

1. Селезнёва О. И., Баранова А. А., Шустов П. А. Влияние пластифицирующих добавок на процесс твердения бетона в условиях сухого жаркого климата // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 2. С. 364–371. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-2-364-371.
2. Румянцев Е. В., Байбурун А. Х., Соловьев В. Г., Ахмедьянов Р. М., Бессонов С. В. Динамика набора прочности «холодных» самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов при зимнем бетонировании стыков // Строительные материалы. 2021. № 10. С. 12–20. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-796-10-12-20.
3. Kothari A., Habermehl-Cwirzen K., Hedlunt H., Cwirzen A. A Review of the mechanical properties and durability of ecological concretes in a cold climate in comparison to standard ordinary Portland cementbased concrete // Materials. 2020. № 13 (16). Vol. 3467. P. 1–32. DOI: 10.3390/ma13163467.
4. Dar A. R. Influence of cold temperature on performance of concrete in J&K // Comparison studies: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 561. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/561/1/012020.
5. Тараканов О. В., Иващенко Ю. Г., Ерофеева И. В. Влияние органоминеральных добавок на формирование микроstructures и кинетику твердения бетона при отрицательных температурах // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 3 (56). С. 91–102. DOI: 10.54734/20722958_2023_3_91.
6. Тараканов О. В., Акчурун Т. К., Ерофеева И. В., Санягина Я. А., Душко О. В. Перспективы применения бетонов нового поколения в технологии зимнего бетонирования // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 1 (94). С. 81–90. DOI: 10.35211/18154360_2024_1_81.
7. Тараканов О. В., Ильина Л. В., Гичко Н. О. Влияние отрицательных температур на микроstructure, кинетику твердения и прочность цементных материалов // Региональная архитектура и строительство. 2024. № 4 (61). С. 63–72. DOI: 10.54734/20722958_2024_4_63.
8. Говорухина Ю. С. Сравнение методов зимнего бетонирования монолитного пола по грунту // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 115–116. С. 69–72. DOI: 10.18411/trnio-11-2024-755.
9. Кулешов А. П., Николенко И. А., Горлов А. А. Определение несущей способности свайно-винтового фундамента в криолитозоне // Известия Томского политехнического университета // Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 4. С. 163–174. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3917.
10. Мандровский К. П., Доценко А. И., Садовникова Я. С. Экспериментальное исследование несущей способности свайных оснований в условиях отепления мерзлых грунтов // Справочник. Инженерный журнал. 2023. № 4 (313). С. 38–43. DOI: 10.14489/hb.2023.04.pp.038-043.
11. Шарафутдинов З. З. Действие расширяющих добавок на процесс формирования цементного камня // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2022. № 2 (350). С. 28–34. DOI: 10.33285/0130-3872-2022-2(350)-28-34.
12. Харченко А. И., Харченко И. Я., Алексеев В. А., Баженова С. И. Применение расширяющихся цементов для набрызга бетона в тоннельном строительстве // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 11 (134). С. 1438–1448. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1438-1448.
13. Самченко С. В., Воронин В. В., Ларсен О. А., Наруть В. В. Самоуплотняющийся бетон с компенсированной усадкой с использованием материалов из бетонного лома // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 2 (746). С. 71–78. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-71-78.
14. Грищенко А. И., Игнатович И. А., Петросян О. Л. Оптимизация микроstructures композиционных материалов с учетом ограничений на их свойства // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 3. С. 73–86. DOI: 10.18721/JPM.16307.
15. Егорова А. Д., Народов В. В., Местников А. Е. Растворные смеси на основе расширяющихся цементов, твердеющих в условиях вечной мерзлоты // Известия вузов. Строительство. 2008. № 8. С. 28–31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11629736> (дата обращения: 20.02.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.