ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Влияние состава глинистого сырья и комплексного минерального вяжущего на свойства грунтобетонов для дорожного строительства

С.Н.Бондаренко[1], **И.Ю.Маркова**[1]✉, **В.В.Строкова**[1], **М.С.Лебедев**[2]
[1] *Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия*
[2] *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия*

Как цитировать эту статью: Бондаренко С.Н., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Лебедев М.С. Влияние состава глинистого сырья и комплексного минерального вяжущего на свойства грунтобетонов для дорожного строительства // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 2. С. 48-59. EDN PCASKG

Аннотация
Сегодня проблемы переработки некондиционного сырья представляют всеобщий интерес, что подтверждается реализацией федерального проекта «Экономика замкнутого цикла», в рамках которого рассматриваются альтернативные источники сырья (вскрышные породы и близкие по составу естественно залегающие грунты), а также рациональные технологические решения их переработки, обеспечивающие эффективную замену традиционного сырья, такого как щебень и песок. С учетом исходных параметров сырья разработаны составы грунтобетонов с применением комплексного минерального вяжущего, обеспечивающего получение заданных физико-механических и водно-физических свойств. Для установления характера и механизмов взаимодействия сырья с компонентами в системе при синтезе композитов использован комплекс физико-химических аналитических методов с применением высокоточного оборудования. Свойства исходного сырья проанализированы с применением методик, регламентированных ГОСТ 25100-2020; свойства синтезированных композитов – ГОСТ Р 70452-2022. Результаты свидетельствуют о том, что применяемые подходы позволяют получать эффективные дорожно-строительные композиты для устройства оснований автомобильных дорог, обладающие маркой по прочности М40-М75, по морозостойкости F10-F15. Разработанные подходы будут способствовать масштабированию предлагаемого решения, в том числе для рециклинга отходов горно-добывающих предприятий в виде вскрышных пород, имеющих преимущественно глинистый состав.

Ключевые слова
глинистое сырье; цемент; полимерно-минеральная добавка; комплексное минеральное вяжущее; грунтобетон; физико-механические свойства; фазовый состав

Финансирование
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00796-П, https://rscf.ru/project/23-19-00796-П/, с использованием оборудования Центра высоких технологий на базе БГТУ им. В.Г.Шухова.

Поступила: 23.06.2026 ***Принята: 29.09.2026*** ***Онлайн: 30.10.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Горно-добывающая промышленность представляет собой комплекс отраслей, осуществляющих разведку, добычу и первичную переработку полезных ископаемых. Добыча полезных ископаемых всегда сопряжена с масштабным накоплением отходов. В России общий годовой объем всех отходов горно-добывающей промышленности[1] достигает 8-9 млрд т. Эти техногенные образования не только занимают значительные территории, но и оказывают многофакторное негативное воздействие на экосистему: загрязняют почвы и водоемы фильтрационными стоками с низким pH (1-3) и высокой минерализацией (до 50 г/л); способствуют вымыванию тяжелых металлов и сульфатионов (до 30 г/л); изменяют гидрологический режим и микроклимат прилегающих территорий; снижают биоразнообразие и продуктивность земель [1]. В условиях нарастающего антропогенного

[1] Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2024 году». URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2024_/ (дата обращения 23.06.2026).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

воздействия на окружающую среду и интенсификации промышленного производства особую актуальность приобретают вопросы рационального использования материальных ресурсов и минимизации экологических рисков. На сегодняшний день проблемы переработки некондиционного сырья представляют особый интерес [2-4], что вызвано не только накоплением техногенных отходов различных отраслей промышленности, но и возникновением дефицита первичных традиционных ресурсов, связанных в том числе с ограничениями на добычу [5].

Глобальный тренд на устойчивое развитие и циркулярную экономику диктует необходимость переосмысления подходов к управлению материальными потоками [6, 7]. Традиционная линейная модель добыча – производство – утилизация демонстрирует свою неэффективность: объемы промышленных отходов достигают критических значений, создавая серьезные экологические угрозы, а истощение природных месторождений стратегически важных сырьевых компонентов ставит под вопрос долгосрочную ресурсную безопасность многих отраслей. В этой связи разработка эффективных подходов к применению техногенного сырья весьма актуальна [8-10].

Одним из крупнейших потребителей минерально-сырьевых ресурсов является строительная отрасль [11, 12]. При этом в сложившихся условиях в различных областях строительства все чаще рассматриваются возможности использования вторичного и техногенного сырья [13-15]. Анализ научных публикаций в обозначенном направлении свидетельствует о распространенности данной проблемы и активных поисках путей ее решения [15-17]. Среди прочих областей строительства дорожное является крупнейшим потребителем техногенных отходов [18-20], в рамках деятельности которой переработке подлежат миллионы тонн различных промышленных отходов, не исключением являются и вскрышные породы. Опыт использования вторичного и техногенного сырья в дорожном строительстве показывает возможность эффективной частичной или полной замены традиционного сырья без снижения заданных конечных эксплуатационных параметров конструкций автомобильных дорог [21-23]. Однако, обладая огромным потенциалом, зачастую такие отходы требуют использования различных способов обработки (иногда их комплекса), обеспечивающих надлежащее качество конечного продукта [24-26].

Так, вскрышные породы характеризуются неоднородным составом и включают осадочные, магматические и метаморфические породы от глин и песков до щебня. Химический и минеральный составы представлены высокой долей глинистой составляющей, кремнеземных компонентов, оксидов алюминия, кальция и магния [27, 28]. В связи с этим использование в дорожном строительстве таких материалов в первозданном виде не представляется возможным – необходимо соблюсти требования водо- и морозостойкости, потому что глинистое сырье представляет собой гидрофильную систему и способствует накоплению капиллярной жидкости [29, 30]. Применение того или иного подхода определяется прежде всего функциональным назначением минерального сырья из вскрышных пород. Научной школой БГТУ им. В.Г.Шухова неоднократно проводились исследования по разработке технологических решений, обеспечивающих эффективное использование вскрышных пород в дорожном строительстве. Например, при получении минеральных порошков для асфальтобетонов были предложены термическая обработка и механическая активация глинистого сырья [31]. Для получения грунтобетонов на основе глинистого сырья из вскрышных пород показана эффективность различных минеральных вяжущих или их комплекса (известь, цемент) с добавками, позволяющими обеспечить экономическую эффективность получения грунтобетонов при достижении заданных параметров [32-34]. Накопленный опыт показывает, что ввиду непостоянства свойств исходного сырья в каждом конкретном случае требуется индивидуальный подход.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью формирования научно обоснованной базы для перехода к экономике замкнутого цикла, где некондиционное сырье рассматривается не как отходы, а как ценный вторичный ресурс. В рамках исследования предложены подходы к химическому укреплению различных минеральных систем с использованием цементного вяжущего и полимерно-минеральной добавки, а также рассмотрены механизмы фазо- и структурообразования с учетом способа введения добавки. Результаты работы могут быть использованы в рамках реализации стратегий устойчивого развития промышленных предприятий и формирования государственной политики в области обращения со вторичными материальными ресурсами.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Методы

Для установления ключевых особенностей состава различных видов исходного сырья, а также изучения особенностей механизмов фазо- и структурообразования конечного композита в зависимости от состава вяжущего в работе использованы рентгенофазовый анализ, инфракрасная спектроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия и термогравиметрия.

Рентгенофазовый анализ образцов осуществлялся с использованием спектрометра серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции для исследования фазового состава методом рентгеновской дифрактометрии в виде порошка в диапазоне двойных углов 2θ 4-56° и 8-80°. Прибор позволяет проводить рентгенофлуоресцентный анализ элементов от B до U с использованием рентгеновской трубки с Rh-анодом и рентгенофазовый анализ в диапазоне двойных углов 2θ 8-80° с применением трубки с Co-анодом. Обработка данных осуществлялась с помощью программных комплексов – UniQuant 5.56, Siroquant Version 3.0, ICDD DDVIEW 2010, ICDD PDF-2 Release 2010, Difwin, Crystallographica Search-Match.

ИК-спектроскопический анализ осуществлялся с помощью Фурье-ИК-спектрометра VERTEX 70 для качественного анализа материалов и идентификации фазового состава. Поскольку исследуемые материалы представляют рыхлые твердые породы, образцы для исследований спрессовывали в таблетки из смеси материала с бромидом калия. Результат – спектры поглощения в диапазоне 400-4000 $см^{-1}$.

Калориметрические и термогравиметрические исследования проводились с использованием прибора STA 449 F1 Jupiter (NETZSCH) для каждой пробы в рамках единого эксперимента, который сочетал изучение фазовых переходов, реакций разложений и состава материалов, в частности грунтобетона. Анализ образцов производился с использованием корундовых тиглей в температурном диапазоне 25-1000 °C и скоростью нагрева 10 °C/мин в среде инертного газа (N_2).

С целью установления возможности и эффективности применения технологических подходов к получению дорожных грунтобетонов на основе разновидностей исследуемого минерального сырья подготовлены составы грунтобетонов по ГОСТ 23558-94[2] и изучен комплекс их физико-механических показателей в зависимости от количественного содержания и состава применяемого вяжущего с широко используемой в дорожном строительстве при укреплении грунтов добавкой. Прочность на сжатие и растяжение при изгибе укрепленных грунтов определялась в соответствии с ГОСТ 10180-2012[3], морозостойкость – по методике, регламентируемой ГОСТ 10060-2012[4].

Модуль деформации вычислялся по формуле

$$E_o = \sigma / \varepsilon_b,$$

где σ – напряжения в образце грунтобетона; ε_b – полная деформация, вызванная напряжением.

Для проведения экспериментальных исследований по оценке эффективности использования различных видов вяжущих с целью получения дорожных грунтобетонов в работе рассмотрены три пробы минерального сырья (табл.1, 2) [35].

В качестве вяжущего для получения образцов грунтобетона использовались три цементные системы, отличающиеся составом и способами получения. Применяемые вяжущие изготавливались посредством помола в шаровой мельнице. Вяжущее В1 получено без использования добавки и содержит клинкер 85 % и гипс 5 %. Вяжущее В2 получено путем сухого перемешивания вяжущего В1 с полимерно-минеральной добавкой 10 %. Вяжущее В3, или комплексное минеральное вяжущее (КМВ 32,5Н II, в соответствии с ГОСТ Р 70196-2022[5]), получено в результате совместного помола клинкера 85 %, гипса 5 % и полимерно-минеральной добавки 10 %.

Для получения составов вяжущего использовались:

- портландцементный клинкер производства ЗАО «Белгородский цемент» (Белгород);
- природный двуводный гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) Новомосковского месторождения;
- полимерно-минеральная добавка (ПМД) производства ООО «Никель» (Санкт-Петербург).

[2] ГОСТ 23558-94. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия.

[3] ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

[4] ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости.

[5] ГОСТ Р 70196-2022. Дороги автомобильные общего пользования. Комплексные минеральные вяжущие для стабилизации и укрепления грунтов. Технические условия.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Согласно СТО 13881083.002-2021[6], полимерно-минеральная добавка производства ООО «Никель» имеет химический состав, мас.%: CaO 45,0±5,0; SiO_2 43,0±5,0; Al_2O 1,1±0,3; Fe_2O_3 1,4±0,3; MgO 1,1±0,4; F 4,4±1,0; прочее 4,0±1,0. В соответствии с патентами [36, 37], предшествующими СТО 13881083.002-2021, компонентный состав представлен активированным кремнеземом, редиспергируемыми порошкообразными полимерами на основе лигнина, солями кальция и солями натрия.

Обсуждение результатов

По физико-механическим характеристикам (табл.1) рассматриваемое минеральное сырье делится на три принципиально разных вида: проба 1 – суглинок легкий пылеватый; проба 2 – супесь пылеватая; проба 3 – песок. Учитывая существенную разницу по числу пластичности I_P и оптимальной влажности W_{opt}, каждый вид грунта требует индивидуального подбора рациональной дозировки вяжущего с добавкой для достижения экстремальных значений физико-механических и водно-физических свойств грунтобетона.

Таблица 1

Физико-механические характеристики минерального сырья как основы для грунтобетонов, согласно ГОСТ 25100-2020

Проба	Влажность на границе текучести W_L, %	Влажность на границе раскатывания W_P, %	I_P, %	Доля песчаных частиц, %	W_{opt}, %	Плотность скелета грунта ρ_d, г/см^3	pH	Вид грунта в соответствии с классификационными признаками
1	30	18,70	11,30	43	17,70	1,76	7,3	Суглинок легкий пылеватый
2	19	12,88	6,12	55	11,00	2,01	7,0	Супесь пылеватая
3	–	–	–	95	7,03	1,61	7,0	Песок

На основе данных о химическом составе (табл.2) у всех трех проб отмечается преобладание алюмосиликатной составляющей. По сравнению с пробами 1 и 3 (суглинок легкий пылеватый и песок) состав пробы 2 отличается существенными колебаниями диоксида кремния (SiO_2) и оксида кальция (CaO).

Таблица 2

Химический состав минерального сырья как основы для грунтобетонов

Грунт	Содержание, мас.%										
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	SO_3	Другие
Проба 1	57,10	17,67	10,83	5,59	3,97	2,40	1,08	0,77	0,19	0,11	0,29
Проба 2	66,57	19,05	1,64	4,20	3,28	2,25	1,68	0,74	0,22	0,05	0,32
Проба 3	57,46	18,17	9,89	5,83	3,87	2,40	1,10	0,78	0,15	0,06	0,29

Исходя из результатов рентгенофазового анализа установлено (рис.1, *а*), что к основным составляющим рассматриваемого глинистого сырья относятся: кварц, глинистые минералы (каолинит, нонтронит, хлорит, гидрослюда), полевые шпаты, слюда (мусковит), кальцит.

Методом ИК-спектрального анализа (рис.1, *б*) идентифицированы валентные колебания мостиковых (Si–O–Si(Al) и немостиковых (Si–O, Al–O) связей в силикатных и алюмосиликатных группировках минеральных фаз исследуемого сырья. Наиболее интенсивные полосы поглощения зафиксированы в диапазоне 900-1200 см$^{-1}$. Полосы поглощения при 3696 и 3621 см$^{-1}$ соответствуют валентным колебаниям гидроксильных групп (OH^-). Для всех трех минеральных систем отмечается наличие (рис.1, *б*) преимущественно каолинита (полосы поглощения в диапазоне волновых чисел 1120-690 см$^{-1}$) и в меньшей степени глинистых минералов (полосы поглощения в

[6] СТО 13881083.002-2021. Полимерно-минеральная добавка NICOFLOK для смесей с неорганическими вяжущими. Технические условия.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.Н.Бондаренко, И.Ю.Маркова, В.В.Строкова, М.С.Лебедев, 2026

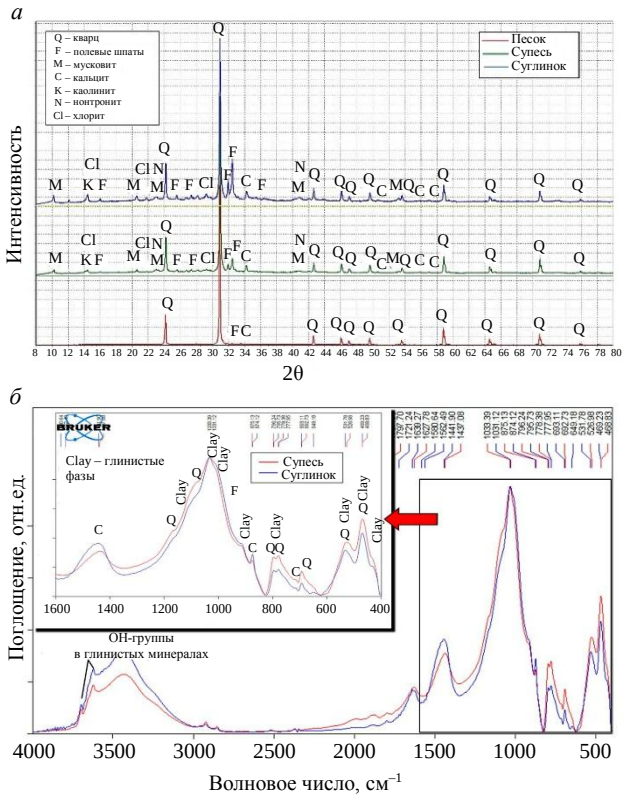


Рис.1. Состав минерального сырья как основы для грунтобетонов:
а – метод рентгеновской дифракции;
б – метод ИК-спектроскопии суглинка легкого пылеватого и супеси пылеватой

диапазоне волновых чисел 520-450 см$^{-1}$); кварца (полосы поглощения в диапазоне волновых чисел 1170-690 см$^{-1}$); кальцита (полосы поглощения в диапазоне волновых чисел 1450-710 см$^{-1}$). Для суглинка легкого пылеватого и супеси пылеватой характерно наложение полос поглощения каолинита на полосы поглощения других алюмосиликатных фаз.

Спектр песка практически идентичен спектру кварца, о чем свидетельствуют основные пики (полосы поглощения в диапазоне волновых чисел 1170-460 см$^{-1}$) (рис.1, *б*). По данным метода ИК-спектроскопии четко идентифицировать такие минералы, как полевые шпаты и слюды, сложно из-за наложения полос поглощения в районе волновых чисел, соответствующих глинистым минералам и кварцу. Результаты ИК-спектроскопического анализа согласуются с данными рентгенофазового анализа.

Комплексный анализ с использованием рентгенофазового и ИК-спектроскопического анализов в сочетании с исходными данными о физико-механических характеристиках и химическом составе минерального сырья позволил определить существенные отличия при переходе между разновидностями исследуемого минерального сырья. На основании проанализированных данных среди исследуемого минерального сырья наиболее высокой активностью в отношении гидравлических вяжущих веществ характеризуется суглинок легкий пылеватый. Данная особенность обусловлена его гранулометрическим составом, в частности наиболее высоким по сравнению с другими образцами содержанием высокодисперсных фракций, обладающих потенциальной способностью к формированию цементирующих связей. Следовательно, суглинок легкий пылеватый очевидно потребует меньшего количества вяжущих для достижения требуемых физико-механических параметров. Напротив, песок будет проявлять меньшую активность, и для достижения требуемых физико-механических параметров грунтобетона на его основе вероятно потребуется бóльшее количество вяжущих по сравнению с другими видами сырья. При этом важнейшая роль при подборе рациональных составов грунтобетонов на основе глинистого сырья отводится направлению использования грунтобетона и как следствие условиям эксплуатации (интенсивность прикладываемых нагрузок, условия увлажнения и цикличность переходов через 0 ºС). Наиболее рациональным, ресурсоемким и простым с позиции практического применения для обозначенных разновидностей сырья в дорожном строительстве является устройство слоев оснований.

Исходя из комплексного анализа влияния различных составов вяжущего и их концентрации на физико-механические свойства образцов грунтобетона, на основе исследуемых минеральных систем установлено, что наиболее эффективны составы грунтобетона с использованием комплексного минерального вяжущего (В3, рис.2). Для минеральных систем в виде суглинка легкого пылеватого и супеси пылеватой с высокой долей глинистой составляющей достаточно использования 4-6 % КМВ, тогда как для песка необходимо использование КМВ не менее 8 %. При этом по данным показателей прочности на сжатие и морозостойкости в соответствии с ГОСТ 23558-94 обеспечивается получение грунтобетонов марок по прочности М40-М75 и морозостойкости F10-F15.

Согласно данным рентгенофазового анализа, существенных отличий между исходным сырьем и образцами грунтобетона с использованием различных составов вяжущего не выявлено (рис.3, *а*). Применение ИК-спектроскопии все же позволило выявить некоторые отличия (рис.3, *б*).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.Н.Бондаренко, И.Ю.Маркова, В.В.Строкова, М.С.Лебедев, 2026

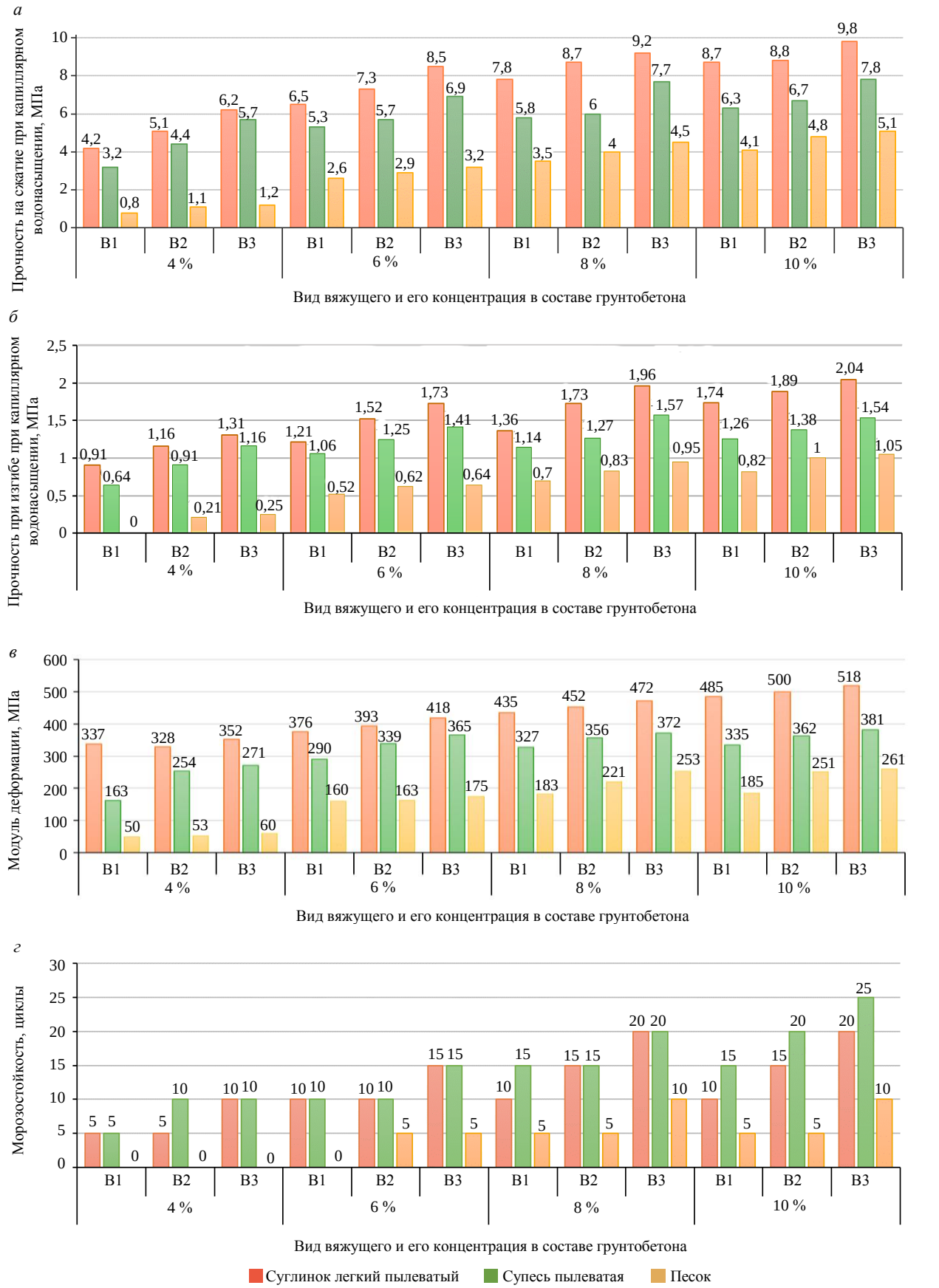


Рис.2. Физико-механические характеристики образцов грунтобетона в зависимости от разновидности минерального сырья, состава и концентрации вяжущего: *а* – прочность на сжатие при капиллярном водонасыщении; *б* – прочность при изгибе при капиллярном водонасыщении; *в* – модуль деформации; *г* – морозостойкость

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

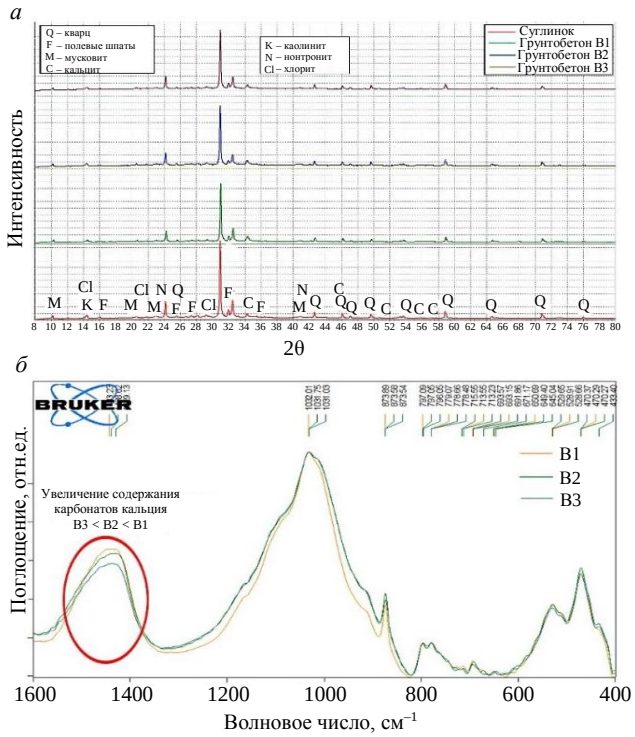


Рис.3. Результаты анализа фазового состава грунтобетона на основе суглинка легкого пылеватого с различными составами вяжущего с использованием рентгеновской дифракции и ИК-спектроскопии:
а – рентгенограмма; *б* – инфракрасные спектры

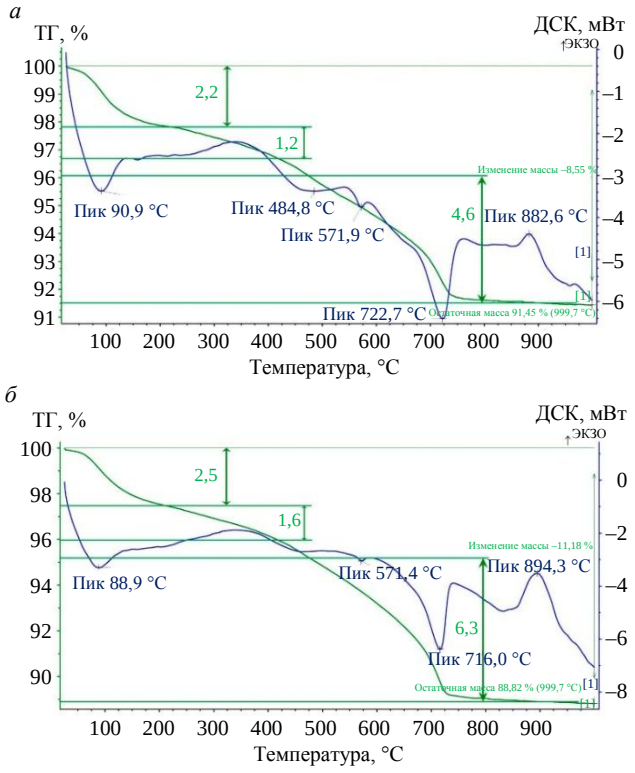


Рис.4. Результаты исследований образцов с помощью ДСК и ТГ: *а* – суглинка легкого пылеватого; *б* – грунтобетона на основе суглинка легкого пылеватого в возрасте 28 сут

Незначительные отклонения спектров в диапазоне волновых чисел 900-1200 $см^{-1}$, практически не затрагивающие область силикатных и алюмосиликатных группировок минеральных фаз грунта, свидетельствуют об устойчивости основной каркасной структуры. В результате получения разностной кривой в указанном диапазоне изображение мало информативно. Видимое различие между полученными спектрами отмечается по полосам поглощения в диапазоне волновых чисел 1400-1500 $см^{-1}$ и в районе 875 $см^{-1}$, присущим карбонатам кальция (рис.3, *б*). По сравнению с исходным сырьем в составах грунтобетона их заметно больше и, в зависимости от состава вяжущего, количество увеличивается в следующем порядке от меньшего к бóльшему: грунтобетон с использованием В3 → грунтобетон с использованием В2 → грунтобетон с использованием В1.

В случае грунтобетона на основе суглинка тяжелого пылеватого наиболее информативными для анализа процессов фазо- и структурообразования в результате гидратации вяжущего стали методы дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) (рис.4) и термогравиметрии (ТГ) (табл.3).

Поскольку основу грунтобетона на 90 % и более составляет суглинок легкий пылеватый, полученные кривые весьма схожи (рис.4). Ввиду присутствия до 10 % вяжущего, содержащего цемент, в составе грунтобетона идентифицируется некоторое количество гидратных образований. Процессы, происходящие в результате твердения, схожи с процессами в цементных системах, но отличаются глубиной эффектов и большей потерей массы.

Методом ДСК выявлено шесть основных термических эффектов, характеризующих физико-химические превращения в исследуемом материале. Эндотермический эффект в интервале 50-120 °C с максимумом при 90 °C обусловлен потерей массы образца за счет удаления адсорбированной и структурной воды (рис.4, *а*). Следующий эффект при 485 °C, сопровождающийся снижением массы до температуры 700 °C, связан с дегидратацией глинистых минералов (каолинита, контронита, хлорита) – удалением гидроксильных групп и трансформацией их кристаллических решеток. Наложение процессов выше 700 °C не что иное, как продолжающаяся дегидратация глинистых минералов, которая перекрывается следующим эндотермическим эффектом при 723 °C – соответствует разложению кальцита ($CaCO_3$). Поли-

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

морфный переход кварца при 572 °С – обратимое превращение α-кварца в β-кварц, фиксируемое как отдельный эндотермический пик. Эндоэффект при 883 °С предположительно связан с образованием шпинели ($MgAl_2O_4$ или аналогичных соединений) в результате термического распада глинистых минералов. Дополнительные процессы, проявляющиеся в температурном диапазоне, характерны для структурных изменений цементного камня (табл.3) и обусловлены присутствием цемента в составе грунтобетона. Потери массы для исходного минерального сырья в виде суглинка легкого пылеватого составляют около 9 %; для грунтобетона на его основе – свыше 11 % (рис.4, *б*). Температурный диапазон исследования разделен на характерные интервалы с учетом влияния компонента в виде цементного вяжущего, что позволило дифференцировать эффекты, связанные с минералогическим составом исходного минерального сырья и процессами гидратации/дегидратации цементного камня.

Таблица 3

Изменение массы образцов исходного сырья и композита на его основе на 28-е сут в соответствии с температурными диапазонами

Диапазон температур, °С	Потеря массы, %		Процесс
	Суглинок легкий пылеватый	Грунтобетон	
25-220	2,2	1,1	Удаление влаги и дегидратация CSH-геля и гидросульфоалюминатов кальция
220-420	2,5	1,6	Дегидратация C_4AH_{13} (и, возможно, C_3AH_6)
475-900	4,6	6,3	Потеря структурных ОН-групп C-S-H и разложение ватерита и кальцита

Температурный отрезок 420-475 °С демонстрирует сопоставимую потерю массы обоими образцами, но не несет существенной информации ввиду отсутствия в них портландита. Сравнение изменений массы в иных температурных интервалах (табл.3) указывает на значительное содержание в грунтобетоне гидросиликатов, гидроалюминатов и карбонатов кальция, что подтверждается ИК-спектроскопией (см. рис.3, *б*).

Согласно данным рентгенофазового анализа (РФА) (рис.5, *а*), в составе грунтобетонов на основе супеси пылеватой с различными составами вяжущего не выявлены клинкерные фазы и

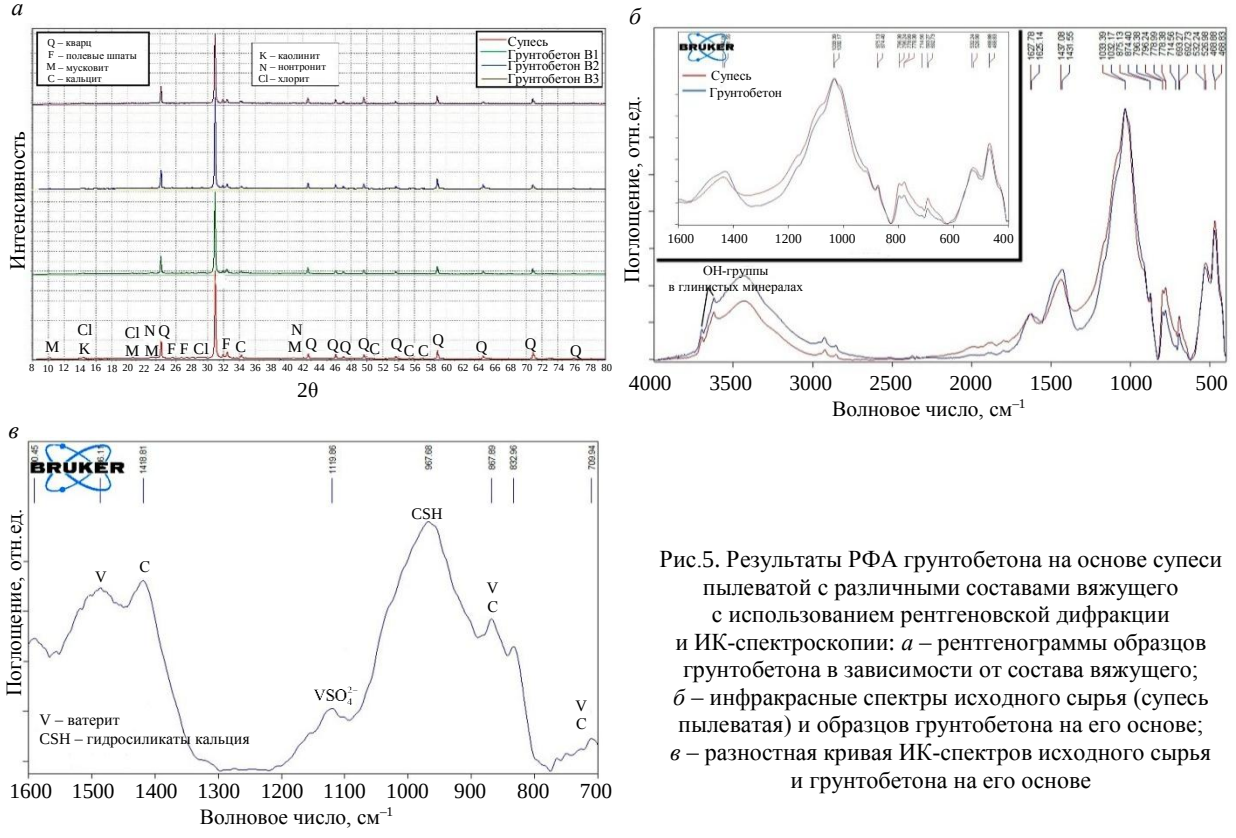


Рис.5. Результаты РФА грунтобетона на основе супеси пылеватой с различными составами вяжущего с использованием рентгеновской дифракции и ИК-спектроскопии: *а* – рентгенограммы образцов грунтобетона в зависимости от состава вяжущего; *б* – инфракрасные спектры исходного сырья (супесь пылеватая) и образцов грунтобетона на его основе; *в* – разностная кривая ИК-спектров исходного сырья и грунтобетона на его основе

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

продукты гидратации, в том числе портландит $Ca(OH)_2$. Дифракционные картины исходного сырья и грунтобетонов демонстрируют высокую степень сходства. Минералогический состав образцов включает кварц, полевые шпаты, мусковит, глинистые минералы (каолинит, нонтронит, хлорит) и кальцит, что свидетельствует о высоком сходстве с составом суглинка легкого пылеватого. Присутствие карбоната кальция в исходном сырье может быть обусловлено процессом карбонатизации кальцийсодержащих соединений.

Отсутствие кристаллических новообразований, фиксируемое методом РФА, вероятно связано с их наноразмерной дисперсностью, не позволяющей детектировать фазы стандартными рентгенографическими методами.

При использовании ИК-спектроскопии (рис.5, *б*) существенных отличий между исходным сырьем и образцами грунтобетона также не обнаружено. Лишь более детальный анализ спектров в диапазоне волновых чисел 400-1600 $см^{-1}$ позволил выявить некоторые отличия линии спектра после твердения. Здесь отмечаются снижение интенсивности полос поглощения в диапазонах 620-800 $см^{-1}$ и 1050-1400 $см^{-1}$, а также увеличение интенсивности в области 900-1000 $см^{-1}$, где располагаются полосы поглощения силикатов и гидросиликатов кальция (рис.5, *б*).

В ИК-спектрах наблюдаются снижение интенсивности полос поглощения в диапазонах 620-800 $см^{-1}$ и 1050-1400 $см^{-1}$, а также увеличение интенсивности в области 900-1000 $см^{-1}$, соответствующей полосам поглощения силикатов и гидросиликатов кальция (рис.5, *б*). По результатам построения разностной кривой между спектрами грунтобетона и исходного минерального сырья в виде супеси пылеватой зафиксирован отчетливый пик при 968 $см^{-1}$, ассоциируемый с полосами поглощения CSH-геля (рис.5, *в*). Дополнительно выявлены два характерных пика при 1419 и 1485 $см^{-1}$, соответствующие кальциту и ватериту. Отсутствие пиков, характерных для портландита, согласуется с данными РФА.

Согласно результатам РФА (рис.6), в грунтобетоне на основе песка независимо от состава вяжущего, наряду с характерными минералами основы грунтобетона (кварц, полевые шпаты),

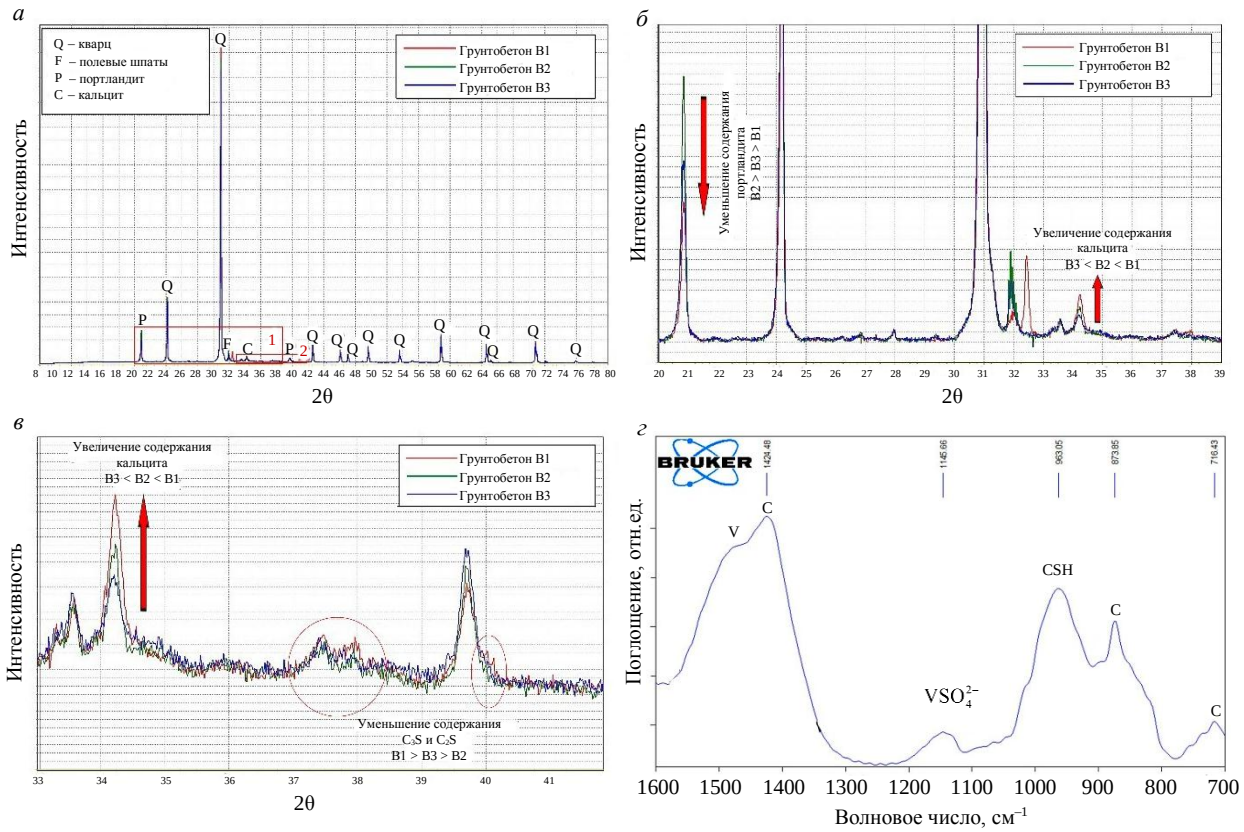


Рис.6. Результаты анализа фазового состава грунтобетона на основе песка с различными составами вяжущего с использованием рентгеновской дифракции и ИК-спектроскопии:
а – общая рентгенограмма; *б* – фрагменты рентгенограммы в диапазоне 2θ = 20-39°;
в – фрагменты ренгенограммы в диапазоне 2θ = 33-42°; *г* – ИК-спектр

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

идентифицируются портландит, кальцит и силикаты кальция (алит, белит). Для удобства сопоставления рентгенограмм кривые нормированы по интенсивности основного отражения кварца d = 3,35 Å.

В зависимости от состава вяжущего, используемого для получения грунтобетона, выявлены колебания количественного содержания портландита $Ca(OH)_2$ (по основному пику d = 4,94 Å). Так, набольшим содержанием портландита характеризуется грунтобетон с использованием состава вяжущего В2, а наименьшим – вяжущего В1. В свою очередь, наибольшей интенсивностью отражения основного пика кальцита ($CaCO_3$), представляющего собой продукт карбонатизации портландита, образующегося при гидратации цемента, характеризуется грунтобетон с использованием вяжущего В3, а наименьшим – вяжущего В1. В результате грунтобетон на основе песка с использованием цемента без добавки (В1) содержит минимальное количество портландита и максимальное количество кальцита. При использовании добавки, в зависимости от способа ее введения, соотношение портландит/кальцит увеличивается в сторону портландита. Таким образом, использование добавки в составе вяжущих В2 и В3 тормозит процесс преобразования портландита в кальцит, что способствует протеканию реакций между $Ca(OH)_2$ со входящим в состав добавки аморфным кремнеземом, с последующим образованием гидросиликатов кальция, что обуславливает улучшение физико-механических характеристик грунтобетона.

В результате получения разностной кривой инфракрасных спектров грунтобетона и песка индентифицированы фазы ватерита, а также гидросиликатов кальция (рис.6). Спектры не демонстрируют принципиальных различий независимо от состава применяемого вяжущего.

С помощью линейной модели удалось наглядно продемонстрировать выявленные зависимости (рис.7). При переходе от суглинка легкого пылеватого к песку наблюдается снижение содержания глинистых частиц в исследуемых минеральных системах, что приводит к уменьшению прочностных показателей грунтобетонных составов. Как следствие, наклон графиков относительно оси *X* становится менее крутым.

В результате выявлена закономерность – интенсивность роста прочности на сжатие образцов грунтобетона при использовании составов вяжущего от В1 до В3 возрастает с повышением содержания глинистой составляющей в исходном сырье, которое характеризуется числом пластичности (рис.7, *б*). График демонстрирует близкое соответствие данных линейной зависимости – коэффициент линейной аппроксимации превышает 0,99.

Заключение

В рамках проведенного исследования показана эффективность использования комплексного минерального вяжущего, полученного путем совместного помола цементного клинкера, гипса и полимерно-минеральной добавки для получения грунтобетонов на основе глинистого сырья. Сравнительный анализ комплекса физико-механических характеристик позволил выявить возможности экономии вяжущего в два раза и эффективного использования некондиционного глинистого сырья при получении грунтобетона различных марок по прочности М40-М75 и морозостойкости F10-F15. Такие

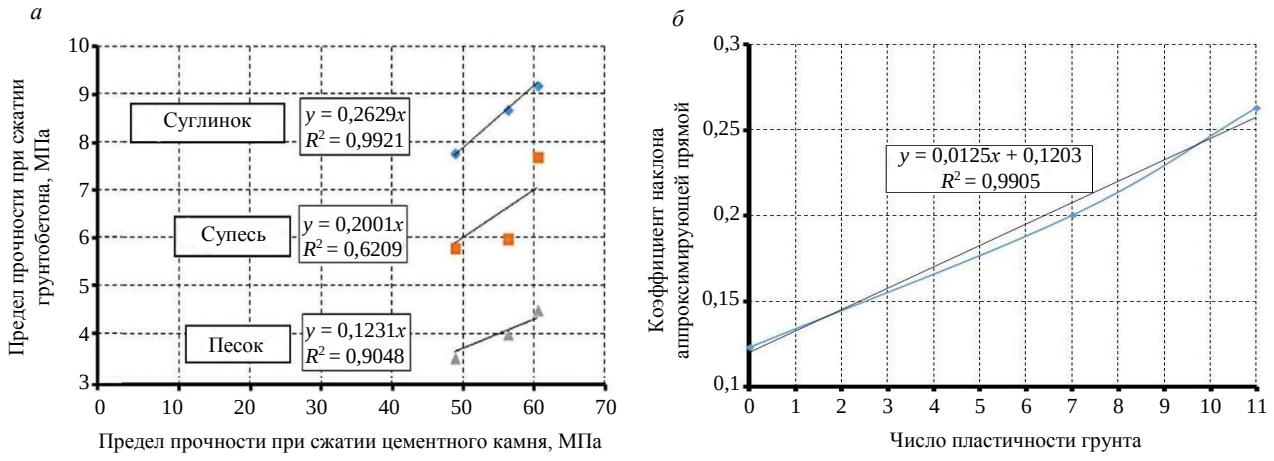


Рис.7. Зависимости изменения прочности на сжатие образцов грунтобетона с учетом содержания глинистой составляющей в исходном сырье и применяемого состава вяжущего (*а*); изменения коэффициента наклона графика от числа пластичности исходной минеральной системы (*б*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

составы грунтобетона рекомендуется применять для устройства слоев оснований как облегченного, так и капитального типа дорожных одежд при оптимальном содержании КМВ в составе грунтобетона – на основе суглинка легкого пылеватого и супеси пылеватой 4-6 % в зависимости от типа дорожной одежды и требуемой марки конечного материала, а на основе песка ≥ 8 %. С учетом замены традиционных первичных ресурсов в виде песка в нижнем слое основания экономический эффект от использования глинистого сырья может достигать до 15 % от общей сметной стоимости строительства.

На основании данных об особенностях фазо- и структурообразования в образцах грунтобетона установлено, что применение КМВ обеспечивает выраженный синергетический эффект – компоненты полимерно-минеральной добавки взаимодействуют с вяжущим, улучшая свойства грунтобетона при использовании всех рассмотренных разновидностей минерального сырья. Ключевую роль в формировании плотной и прочной структуры играет содержание глинистых частиц в исходном сырье. В композитах на основе разновидностей минеральных систем с большой долей глинистой составляющей, помимо первичных цементирующих продуктов, образуются вторичные, которые возникают в результате пуццолановых реакций между алюмосиликатными глинистыми минералами и гидроксидом кальция. Прослеживается зависимость: чем ниже доля кварца и иных минералов, тем заметнее вклад вторичных цементирующих продуктов. Использование полимерно-минеральной добавки усиливает данный эффект, а максимальный результат достигается при применении КМВ, полученного совместным помолом с добавкой, так как в составе присутствует добавка аморфного кремнезема, который также участвует в пуццолановых реакциях и способствует образованию дополнительных цементирующих продуктов. Наиболее выраженный эффект при использовании КМВ объясняется равномерностью распределения добавки не только в составе вяжущего, но и в составе грунтобетонной смеси.

Таким образом, полученные положительные результаты позволяют сделать вывод об эффективности применения комплексного минерального вяжущего с использованием полимерно-минеральной добавки для получения грунтобетонов на основе глинистого сырья. Ввиду сходства состава и свойств рассматриваемого техногенного сырья как основы для грунтобетонов со вскрышными породами и имеющимися данными о закономерности процессов фазо- и структурообразования в зависимости от разновидности сырья предлагаемые подходы можно рекомендовать для утилизации глинистых отходов горно-добывающей промышленности. Учитывая объемы потребления минерально-сырьевых ресурсов в дорожном строительстве, активное использование вскрышных пород не только будет способствовать получению существенного экономического эффекта, но и внесет весомый вклад в улучшение экологической обстановки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Прибыловская А.В.* Оценка негативного экологического воздействия хвостов продуктов флотационного обогащения железных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № S1-1. С. 58-67. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_1_1_58

2. *Вержанский А.П.* Проблемы освоения техногенных минеральных ресурсов в России // Горный журнал. 2016. № 7. С. 105-106.

3. *Пашкевич М.А., Матвеева В.А., Евдокимова М.Е.* Использование титанового шлама для получения коагулянта // Обогащение руд. 2026. № 1. С. 50-56. DOI: 10.17580/or.2026.01.08

4. *Дука А.А., Пашкевич М.А., Сверчков И.П.* Повышение эффективности термической утилизации низкосортного угольного сырья путем внесения добавок карбонатов щелочных металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 11-1. С. 113-130. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_113

5. *Бутов И.И., Орлова И.Г., Дмитриева С.В.* Отходы недропользования: попытка нормативно-правового регулирования // Экология производства. 2021. № 11 (208). С. 18-23.

6. *Пустенко Я.В., Полищук Л.С., Тихомирова Е.В. и др.* Экономические аспекты перехода к циркулярной модели использования строительных материалов в контексте устойчивого развития // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Т. 15. № 3А. С. 295-308.

7. *Dorokhina E.Yu., Kharchenko S.G.* Circular Economy in Russia // Circular Economy: Recent Trends in Global Perspective. Springer, 2021. P. 309-327. DOI: 10.1007/978-981-16-0913-8_10

8. *Герасимов А.М., Устинов И.Д., Зырянова О.В.* Использование глиносодержащих отходов в качестве пуццолановых добавок // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 313-320. DOI: 10.31897/PMI.2023.33

9. *Smirnov Yu.D., Suchkov D.V., Danilov A.S., Goryunova T.V.* Artificial soils for restoration of disturbed land productivity // Eurasian Mining. 2021. № 2. P. 92-96. DOI 10.17580/em.2021.02.19

10. *Тарасов П.И., Хазин М.Л., Апакашев Р.А.* Использование отходов горнодобывающей промышленности Урала // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 1. С. 21-31. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-21-31

11. *Муртазаев С.-А.Ю., Омаров А.О., Саламанова М.Ш.* Высокопрочные бетоны на основе использования вторичных техногенных ресурсов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Т. 45. № 1. С. 204-213. DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-1-204-213

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

12. *Чавез Феррейра К.Й.* Экономический механизм регулирования использования ресурсов техногенных месторождений на основе проектного финансирования // Горизонты экономики. 2020. № 2 (55). С. 72-79.

13. *Худякова Л.И.* Использование отходов горнодобывающей промышленности в производстве строительных материалов // XXI век. Техносферная безопасность. 2017. Т. 2. № 2. С. 45-56.

14. *Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А. и др.* Вторичные ресурсы в производстве композиционных строительных материалов на основе цемента // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 10. С. 49-60. DOI: 10.18799/24131830/2023/10/4304

15. *Singh N.B.* Clays and Clay Minerals in the Construction Industry // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 3. № 301. DOI: 10.3390/min12030301

16. *Tole I., Delogu F., Qoku E. et al.* Enhancement of the pozzolanic activity of natural clays by mechanochemical activation // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 352. № 128739. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128739

17. *Baki V.A., Xinyuan Ke, Heath A. et al.* Improving the pozzolanic reactivity of clay, marl and obsidian through mechanochemical or thermal activation // Materials and Structures. 2024. Vol. 57. Iss. 1. № 9. DOI: 10.1617/s11527-023-02280-z

18. *Жукенова Г.А., Кажмуратов М.К.* Опыт использования материалов вскрышных пород в земляном полотне автодорог // Наука и техника Казахстана. 2020. № 3. С. 89-93.

19. *Barisoglu E.N., Ghalandari T., Snoeck D. et al.* Utilising construction and demolition waste in soft soil stabilisation: A prediction model for enhanced strength and stiffness // Transportation Geotechnics. 2025. Vol. 51. № 101530. DOI: 10.1016/j.trgeo.2025.101530

20. *Reiterman P., Mondschein P., Doušová B. et al.* Utilization of concrete slurry waste for soil stabilization // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 16. № e00900. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00900

21. *Shinde B., Sangale A., Pranita M. et al.* Utilization of waste materials for soil stabilization: A comprehensive review // Progress in Engineering Science. 2024. Vol. 1. Iss. 2-3. № 100009. DOI: 10.1016/j.pes.2024.100009

22. *Díaz-López J.L., Rosales J., Agrela F. et al.* Evaluation of geotechnical, mineralogical and environmental properties of clayey soil stabilized with different industrial by-products: A comparative study // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 449. № 138497. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138497

23. *Balykov A.S., Nizina T.A., Volodin V.V., Kyashkin V.M.* Effects of Calcination Temperature and Time on the Physical-Chemical Efficiency of Thermally Activated Clays in Cement Systems // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1017. P. 61-70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1017.61

24. *Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю., Кузнецов Д.А.* Особенности взаимодействия альтернативных дисперсных пористых минеральных материалов с органическим вяжущим // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 4 (724). С. 35-46.

25. *Гончарова М.А., Бондарев Б.А., Ткачева И.А., Заева А.Г.* Технологии и применение эффективных дорожно-строительных композитов. Липецк; Елец: Типография, 2023. 157 с.

26. *Melese D.T., Jida G., Beyene R. et al.* Expansive clay subgrade soil improvement using municipal solid waste fly ash: Experimental and numerical approach // Environmental Challenges. 2024. Vol. 16. № 100998. DOI: 10.1016/j.envc.2024.100998

27. *Sukmak G., Sukmak P., Horpibulsuk S. et al.* Generalized strength prediction equation for cement stabilized clayey soils // Applied Clay Science. 2023. Vol. 231. № 106761. DOI: 10.1016/j.clay.2022.106761

28. *Kumari N., Mohan C.* Basics of Clay Minerals and Their Characteristic Properties // Clay and Clay Minerals. IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.97672

29. *Bellara S., Maherzi W., Mezazigh S., Senouci A.* Mineral waste valorization in road subgrade construction: Algerian case study based on technical and environmental features // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. № e02764. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02764

30. *Barwar A., Chandrappa A.K., Sahoo U.C.* Laboratory investigations on stabilization of weak clay soil using rice husk ash and cement // Innovative Infrastructure Solutions. 2022. Vol. 7. Iss. 5. № 327. DOI: 10.1007/s41062-022-00924-7

31. *Лютенко А.О., Лебедев М.С., Строкова В.В.* Анализ отходов горной добычи как потенциального источника сырья для производства дорожно-строительных материалов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. № 31 (50). Ч. 2. С. 445-449.

32. *Trautvain A.I., Akimov A.E., Grichanikov V.A.* Stabilization of the Clay Soil of the Increased Humidity for Road Construction // Innovations and Technologies in Construction. Springer, 2021. P. 66-72. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_10

33. *Bezrodnikh A.A., Strokova V.V., Markova I.Yu., Stepanenko M.A.* Influence of the Composition of the Soil on the Effectiveness of Its Strengthening with Cement // Digital Technologies in Construction Engineering. Springer, 2022. P. 399-405. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8_50

34. *Карацупа С.В., Лютенко А.О., Полежаев К.А., Дмитриева Т.В.* Дорожный грунтобетон с использованием ионного закрепителя грунта // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. № 3 (158). С. 22-23.

35. *Бондаренко С.Н.* Комплексное минеральное вяжущее для укрепления грунтов: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. 18 с.

36. *Митрофанов Н.Г., Панов И.В., Румянцев Д.А. и др.* Патент № 2520118 РФ. Композиция для устройства оснований дорожных одежд и других сооружений. Опубл. 20.06.2014. Бюл. № 17.

37. *Грачева И.В., Гусев Н.К., Дубина С.И. и др.* Патент № 2471914 РФ. Способ холодной регенерации и укрепления материалов дорожных одежд. Опубл. 10.01.2013. Бюл. № 1.

***Авторы*: Светлана Николаевна Бондаренко,** *канд. техн. наук, доцент* (*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-7732-0799*, **Ирина Юрьевна Маркова,** *канд. техн. наук, доцент* (*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия*), *irishka-31.90@mail.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-7569-1825*, **Валерия Валерьевна Строкова,** *д-р техн. наук, заведующий кафедрой* (*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Белгород, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-6895-4511*, **Михаил Сергеевич Лебедев,** *канд. техн. наук, ведущий инженер* (*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-3194-9238*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0