

УДК 666.96...12

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 61.35

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN taepas

DOI 10.62980/2076-0655-2025-184-194

КОМПЛЕКСНЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ ХИМИЧЕСКОЙ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Парфенова А.А., Синицин Д.А., Глазачев А.О., Синицина Е.А., Недосеко И.В.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

АННОТАЦИЯ

Транспортное строительство является важной, но материалоемкой отраслью народного хозяйства. Для устройства слоев оснований автомобильных дорог используются преимущественно щебень из плотных горных пород и песчано-гравийные смеси, которые являются дефицитными материалами. Альтернативой природным каменным материалам являются грунты, укрепленные минеральными вяжущими. Для укрепления грунтов в транспортном строительстве в качестве минерального вяжущего используется портландцемент. Допускается также использование для этой цели комплексных минеральных вяжущих с вторичными ресурсами. В Урало-Поволжском регионе к таким вторичным ресурсам относятся отходы металлургической промышленности – доменные и конверторные шлаки Челябинского и Магнитогорского металлургических комбинатов. Также используются отходы химической промышленности – минеральный продукт содового производства АО «Башкирская содовая компания». На основе указанных выше вторичных ресурсов было разработано комплексное минеральное вяжущее, изготавливаемое путем совместного помола минерального продукта содового производства после предварительного обжига при температуре 950°C и шлака доменного гранулированного Челябинского металлургического комбината. Разработанное комплексное минеральное вяжущее характеризуется прочностью на сжатие 22-24 МПа в возрасте 28 суток нормального твердения, т.е. соответствует марке 22,5 Н по ГОСТ Р 70196-2022 и может использоваться для укрепления связных и несвязных грунтов при устройстве оснований автомобильных дорог.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: комплексное минеральное вяжущее, укрепление грунтов, вторичные ресурсы, металлургический шлак, минеральный продукт содового производства

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Парфенова А.А., Синицин Д.А., Глазачев А.О., Синицина Е.А., Недосеко И.В. Комплексные вяжущие для укрепления грунтов на основе минеральных вторичных ресурсов химической и металлургической промышленности // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 2. – С. 184-194. DOI 10.62980/2076-0655-2025-184-194, EDN taepas

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

QH MATERIALS SCIENCE, COMPOSITES

EDN taepas

DOI 10.62980/2076-0655-2025-184-194

COMPLEX MINERAL BINDERS FOR SOIL STRENGTHENING BASED ON SECONDARY RESOURCES OF THE CHEMICAL AND METALLURGICAL INDUSTRY

Parfenova A.A., Sinitsin D.A., Glazachev A.O., Sinitsina E.A., Nedoseko I.V.

Ufa State Petroleum Technological University

ABSTRACT

Transportation construction is an important but material-intensive branch of the national economy. For the construction of road base layers, crushed stone from dense rocks and sand and gravel mixtures are mainly used, which are scarce materials. An alternative to natural stone materials are soils reinforced with mineral binders. Portland cement is used as a mineral binder to reinforce soils in transportation construction. It is also allowed to use complex mineral binders with secondary resources for this purpose. In the Urals-Volga region, such secondary resources include wastes of the metallurgical industry - blast furnace and converter slag from Chelyabinsk and Magnitogorsk metallurgical plants. Waste from the chemical industry is also used - mineral product from the soda production of JSC Bashkir Soda Company. On the basis of the above mentioned secondary resources a complex mineral binder was developed, produced by joint grinding of mineral product of soda production after preliminary firing at 950°C and granulated blast furnace slag of Chelyabinsk Metallurgical Plant. The developed complex mineral binder is characterized by compressive strength of 22-24 MPa at the age of 28 days of normal hardening, i.e. it corresponds to 22,5 N grade according to GOST R 70196-2022 and can be used for strengthening of cohesive and noncohesive soils in the construction of road bases.

KEY WORDS: complex mineral binder, soil reinforcement, secondary resources, metallurgical slag, mineral product of the soda industry

FOR CITATION: Parfenova A.A., Sinitsin D.A., Glazachev A.O., Sinitsina E.A., Nedoseko I.V. Complex mineral binders for soil strengthening based on secondary resources of the chemical and metallurgical industry // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol. 32, No2-. – Pp. 184 – 194. DOI 10.62980/2076-0655-2025-184-194, EDN taepas

ВВЕДЕНИЕ

Развитие транспортной системы является важной составляющей экономического роста страны. Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р, повышение транспортной доступности территорий, снижение углеродного следа от транспортной отрасли и внедрение конкурентоспособных технологий являются важными целями для устойчивого развития транспортной отрасли. Национальным проектом «Безопасные качественные дороги» в качестве одной из приоритетных задач развития транспортной сети Российской Федерации обозначено существенное увеличение доли автомобильных дорог регионального значения и городских агломераций при использовании местных сырьевых ресурсов и общем снижении стоимости дорожного строительства.

В настоящее время в качестве практически безальтернативного материала для устройства оснований автомобильных дорог используется щебень из плотных горных пород, а также добываемые в карьерах песчано-гравийные смеси. Однако, учитывая дефицит и высокую стоимость традиционных каменных материалов в ряде регионов (в частности, в ряде областей и республик Поволжья), сложность их доставки в отдаленные районы, а также необходимость экономии природного сырья, очень важным является вопрос поиска и применения альтернативных решений к проектированию дорог с учетом возможностей улучшения технико-эксплуатационных свойств и минимизации стоимостных показателей строительных объектов [1, 2]. Для регионов, характеризующихся дефицитом природного каменного сырья, с целью снижения его расхода целесообразным является использование возможностей базового основания – грунтов различного происхождения, состава и свойств [2]. Однако грунт, являясь местным материалом для строительных целей, в большинстве случаев не отвечает определенным техническим требованиям, как это свойственно другим строительным материалам, специально изготовленным для строительства [3]. Ввиду специфики свойств природных грунтов (высокая проницаемость, высокая влажность, низкая прочность и др.), при их использовании в качестве основания дорожных одежд необходимо проводить укрепление грунтов для повышения их физико-механических характеристик и обеспечения надежности и долговечности дорожной конструкции в целом [2]. При этом, согласно действующим нормативным документам (ПНСТ 265-2018, ГОСТ Р 70452-2022), укрепленный грунт может использоваться и как более прочный грунт рабочего слоя земляного полотна дороги, что позволяет снизить расход каменных материалов для устройства вышележащих слоев основания дороги, и в качестве одного из слоев основания дорожной одежды вместо отсыпки из природного каменного материала.

В дорожном строительстве в основном используется технология послойного укрепления грунтов с применением минеральных вяжущих, которую схематично можно представить следующим образом. Стабилизатор-ресайклер с шириной барабана около 2,5 м позволяет производить перемешивание грунта глубиной 10-50 см.

INTRODUCTION

The development of the transport system is an important component of the country's economic growth. According to the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035, approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r, increasing the transport accessibility of territories, reducing the carbon footprint of the transport industry and introducing competitive technologies are important goals for the sustainable development of the transport industry. The national project “Safe High-Quality Roads” has identified as one of the priority tasks for the development of the transport network of the Russian Federation a significant increase in the share of regional roads and urban agglomerations using local raw materials and a general reduction in the cost of road construction.

Currently, crushed stone from dense rocks, as well as sand and gravel mixtures mined in quarries, are used as a virtually uncontested material for constructing road bases. However, given the shortage and high cost of traditional stone materials in a number of regions (in particular, in a number of regions and republics of the Volga region), the difficulty of their delivery to remote areas, as well as the need to save natural raw materials, the issue of finding and applying alternative solutions to road design, taking into account the possibilities of improving technical and operational properties and minimizing the cost indicators of construction projects, is very important [1, 2]. For regions characterized by a shortage of natural stone raw materials, in order to reduce its consumption, it is advisable to use the capabilities of the base foundation - soils of various origins, compositions and properties [2]. However, soil, being a local material for construction purposes, in most cases does not meet certain technical requirements, as is typical for other building materials specially made for construction [3]. Due to the specific properties of natural soils (high permeability, high humidity, low strength, etc.), when they are used as the base of road surfaces, it is necessary to strengthen the soils to improve their physical and mechanical characteristics and ensure the reliability and durability of the road structure as a whole [2]. At the same time, according to the current regulatory documents (PNST 265-2018, GOST R 70452-2022), reinforced soil can be used both as a stronger soil for the working layer of the roadbed, which reduces the consumption of stone materials for the construction of overlying layers of the road base, and as one of the layers of the road base instead of backfill from natural stone material.

In road construction, the technology of layer-by-layer soil strengthening with the use of mineral binders is mainly used, which can be schematically represented as follows. A stabilizer-recycler with a drum width of about 2.5 m allows mixing of soil to a depth of 10-50 cm. As the recycler moves, its milling drum cuts off the road surface layer, after which it is mixed with a cement-water suspension in a mixing chamber, while the water supply is adjusted so that the percentage of moisture is sufficient for the required compaction. After mixing, the soil-cement mixture is fed back to the road, after which it is leveled by a grader to a certain height level and compacted by rollers.

При движении ресайклер своим фрезерным барабаном срезает покрывной слой дороги, после чего в камере для смешивания перемешивает его с цементно-водной суспензией, при этом подача воды корректируется так, чтобы процент влаги был достаточным для нужного уплотнения. После перемешивания грунтоцементная смесь подается обратно на дорогу, после чего разравнивается грейдером до определенного высотного уровня и уплотняется катками.

Проблеме повышения эффективности и качества грунтов, укрепленных портландцементом (цементогрунтов), посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей: В.М. Безрука, В.М. Могилевича, Ю.М. Васильева, Л.В. Гончаровой, О.В. Тюменцевой, Г.А. Левчановского, Л.А. Маркова, В.М. Кнатько, В.А. Кельмана, В.В. Охотина, М.М. Филатова, С.В. Correns, С.С. Dunn, J. Hashimoto, J.K. Mitchell, A. Herzod, G.H. Hilt, D.T. Davidson, J.G. Laguros, T.W. Lambe, R.C. Mainfort и др. Анализ имеющихся работ [4-14] показывает, что основное внимание исследователей сводилось к комплексному укреплению грунтов портландцементом с различными активными добавками, при этом в некоторых случаях для придания грунтам заданных свойств необходим чрезмерный расход вяжущих материалов, что не оправданно экономически. В связи с этим все большее применение находят комплексные методы укрепления грунтов цементом и добавками других активных веществ [15], однако вопросы, связанные с укреплением местных грунтов комплексными вяжущими на основе отходов промышленных производств, в частности, металлургическими шлаками, топливными золами, отходами производства асбеста и др., раскрыты не в полной мере [16].

Республика Башкортостан и Урало-Поволжский регион в целом характеризуются развитой металлургической и химической промышленностью, по результатам деятельности которой образуется большое количество промышленных отходов. В частности, металлургические шлаки (доменные и конверторные) имеются в виде отвалов на Челябинском, Магнитогорском и Новотроицком металлургических комбинатах, фосфогипс является многотоннажным отходом АО «Мелеузовские минеральные удобрения», шламонакопители с дистиллерной жидкостью занимают значительные площади вокруг производственной площадки АО «Башкирская содовая компания». Из перечисленных выше отходов наибольший интерес для изготовления комплексных вяжущих для укрепления грунтов в дорожном строительстве представляют доменные гранулированные шлаки и минеральные отходы содового производства [17], которые были использованы в дальнейших исследованиях.

Целью исследования является разработка комплексного минерального вяжущего для укрепления грунтов на основе вторичных ресурсов химической и металлургической промышленности.

Задачи исследования:

1. Провести анализ отходов промышленных производств Урало-Поволжского региона, потенциально пригодных в качестве компонентов для комплексных минеральных вяжущих.

Провести анализ минерального продукта содового производства (МПСП) – вторичного ресурса АО «Башкирская содовая компания».

The problem of increasing the efficiency and quality of soils reinforced with Portland cement (cement soils) is the subject of numerous works by domestic and foreign researchers: V. M. Bezruk, V. M. Mogilevich, Yu. M. Vasiliev, L. V. Goncharova, O. V. Tyumentseva, G. A. Levchanovsky, L. A. Markov, V. M. Knatko, V. A. Kelman, V. V. Okhotin, M. M. Filatov, C. W. Correns, C. S. Dunn, J. Hashimoto, J. K. Mitchell, A. Herzod, G. H. Hilt, D. T. Davidson, J. G. Laguros, T. W. Lambe, R. C. Mainfort, and others. An analysis of existing works [4-14] shows that the main attention of researchers was limited to the complex strengthening of soils with Portland cement with various active additives, while in some cases, in order to impart the required properties to soils, an excessive consumption of binders is required, which is not economically justified. In this regard, complex methods of soil strengthening with cement and additives of other active substances are increasingly being used [15], however, issues related to strengthening local soils with complex binders based on industrial waste, in particular, metallurgical slag, fuel ash, asbestos production waste, etc., have not been fully disclosed [16].

The Republic of Bashkortostan and the Ural-Volga region as a whole are characterized by a developed metallurgical and chemical industry, the activities of which generate a large amount of industrial waste. In particular, metallurgical slags (blast furnace and converter) are found in the form of waste dumps at the Chelyabinsk, Magnitogorsk and Novotroitsk metallurgical plants, phosphogypsum is a large-tonnage waste of JSC Meleuzovskie Mineral Fertilizers, and sludge storage ponds with distillation liquid occupy significant areas around the production site of JSC Bashkir Soda Company. Of the wastes listed above, the most interesting for the production of complex binders for soil stabilization in road construction are blast furnace granulated slags and mineral waste from soda production [17], which were used in further research.

The aim of the study is to develop a complex mineral binder for soil strengthening based on secondary resources of the chemical and metallurgical industries.

Research objectives:

1. Conduct an analysis of industrial waste from the Ural-Volga region, potentially suitable as components for complex mineral binders.

Conduct an analysis of the mineral product of soda production (MPSP) - a secondary resource of JSC Bashkir Soda Company.

2. Conduct an analysis of granulated blast furnace slag from PJSC Chelyabinsk Metallurgical Plant.

3. Develop a composition of a mineral binder based on a mineral product of soda production and granulated blast furnace slag for use as soil modifiers in the construction of highways.

2. Провести анализ шлака доменного молотого гранулированного ПАО «Челябинский металлургический комбинат».

3. Разработать состав минерального вяжущего на основе минерального продукта содового производства и шлака доменного молотого гранулированного для применения в качестве модификаторов грунта при строительстве автомобильных дорог.

Материалы и методы исследования

Минеральный продукт содового производства (МПСП) является вторичным ресурсом АО «Башкирская содовая компания» и представляет собой твердый кусковой негорючий материал серого цвета, приобретающий, со временем, под действием атмосферных явлений вид рыхлого материала однородного цвета. Фотографии МПСП в состоянии естественной влажности, высушенного до постоянной массы и после обжига представлены на рисунке 1.

В соответствии с ТУ 2149-334-00203312-2015, массовая доля ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) в минеральном продукте содового производства должна составлять не менее 60%, массовая доля влаги – не более 35%, массовая доля хлорид-ионов в водной вытяжке должна составлять не более 0,5%.

РИСУНОК 1

ОБЩИЙ ВИД МИНЕРАЛЬНОГО ПРОДУКТА СОДОВОГО ПРОИЗВОДСТВА:

- а - в состоянии естественной влажности,
б - высушенного до постоянной массы,
в - после обжига

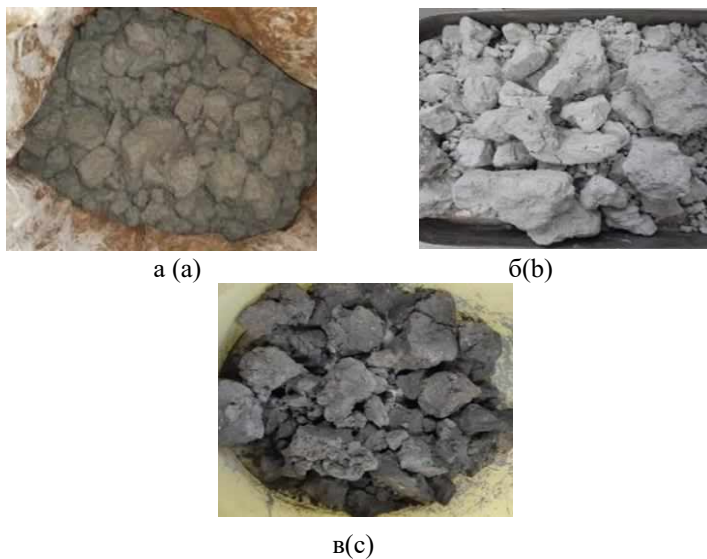


Figure 1

General view of the mineral product of soda production:

- a - naturally moist,
b - dried to constant weight,
c - post-firing

Минеральный продукт содового производства образуется в результате отжима на пресс-фильтрах до влажности 30-35% шламов дистиллерной жидкости, которые являются отходом производства кальцинированной соды, данная технология используется заводом АО «Башкирская содовая компания» в городе Стерлитамак (Республика Башкортостан). На одну тонну продукции приходится 8-10 м³ шламов, содержащих в своём составе 200-250 кг твёрдой фазы. Ежегодный сброс отходов содового производства оценивается от 300 до 400 тыс. тонн, а общий объем накоплений (в пересчёте на сухое вещество) составляют по разным оценкам от 20 до 30 млн. т. [18]. Проводимыми ранее исследованиями показано, что минеральный продукт содового производства после обезвоживания и обжига при температуре около 900°C проявляет активные свойства аналогично извести [19] и является потенциальным источником сырья для производства строительных материалов – комплексных

Materials and methods of research

Mineral product of soda production (MPSP) is a secondary resource of JSC Bashkir Soda Company and is a solid, lumpy, non-combustible, gray material that, over time, under the influence of atmospheric phenomena, acquires the appearance of a loose material of uniform color. Photographs of the MPSP in a state of natural moisture content, dried to a constant weight and after firing are shown in Figure 1.

In accordance with TU 2149-334-00203312-2015, the mass fraction of ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) in the mineral product of soda production must be at least 60%, the mass fraction of moisture must be no more than 35%, the mass fraction of chloride ions in the aqueous extract must be no more than 0.5%.

The mineral product of soda production is formed as a result of pressing on press filters to a moisture content of 30-35% of distillation liquid sludge, which is a waste product of soda ash production; this technology is used by the plant of JSC Bashkir Solovaya Company in the city of Sterlitamak (Republic of Bashkortostan). One ton of production contains 8-10 m³ of sludge, containing 200-250 kg of solid phase. The annual discharge of soda production waste is estimated at 300 to 400 thousand tons, and the total volume of accumulations (in terms of dry matter) is, according to various estimates, from 20 to 30 million tons [18]. Previous studies have shown that the mineral product of soda production after dehydration and firing at a temperature of about 900°C exhibits active properties similar to lime [19] and is a potential source of raw materials for the production of building materials – complex mineral binders [20], sand-lime brick, aerated concrete, building mortars [19].

минеральных вяжущих [20], силикатного кирпича, газобетона, строительных растворов [19].

Минералогический состав МПСР был определен путем исследования 10 проб МПСР, отобранных после отжима шламов дистиллерной жидкости на пресс-фильтре, в Инновационном центре «Лаборатория нанотехнологий цементных систем имени профессоров А.Ф. Полака и Н.Х. Каримова» Архитектурно-строительного института УГНТУ, с использованием рентгеновского дифрактометра BRUKERD2 Phaser.

Рентгенограмма одной из проб МПСР представлена на рисунке 2, результаты исследований всех проб представлены в таблице 1. Также был проведен синхронный термический анализ проб МПСР с использованием синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter с квадругольным масс-спектрометром QMC 409C Aeolos, который представляет собой совмещенный ТГА/ДСК/СТА анализатор, результаты по одной из проб представлены на рисунке 3.

РИСУНОК 2

РЕЗУЛЬТАТЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО РЕНТГЕНОФАЗОВОГО АНАЛИЗА МПСР (проба №2)

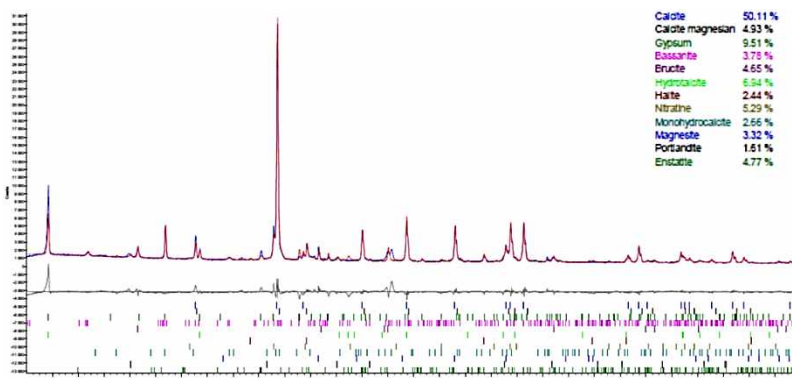


Figure 2

Results of quantitative X-ray phase analysis of MPSP (sample No.2)

РИСУНОК 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МПСР (проба №3)

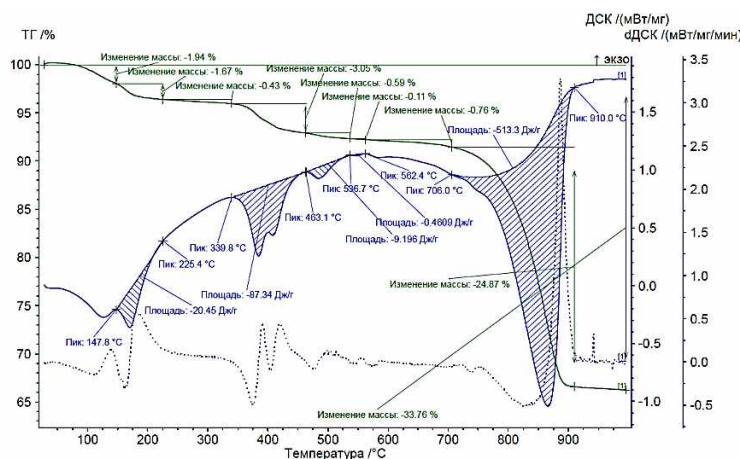


Figure 3

Results of thermal analysis of MPSP (sample No.3)

Обжиг образцов МПСР (после предварительной сушки) производился в муфельной печи при температуре 950°C (необходимая температура обжига была определена по результатам термического анализа). Для обжига была принята усредненная проба МПСР, высушенная до постоянной массы. Фотография МПСР после обжига представлена на рисунке 1в. Результаты рентгенофазового анализа МПСР после обжига представлены в таблице 2.

Активность МПСР после обжига определялась по методике ГОСТ 30744-2001 и ГОСТ 22688-2018. При определении активности материалов пластичный раствор (нормальная плотность которого определялась по методике ГОСТ 310.4-81) приготавливался путем

The mineralogical composition of the MPSP was determined by studying 10 samples of MPSP, taken after pressing out the sludge of the distillation liquid on a press filter, in the Innovation Center "Laboratory of Nano-technologies of Cement Systems named after Professors A.F. Polak and N.Kh. Karimov" of the Architectural and Civil Engineering Institute of Ufa State Petroleum Technological University, using a BRUKERD2 Phaser X-ray diffractometer.

An X-ray of one of the MPSP samples is shown in Figure 2; the results of the studies of all samples are presented in Table 1. Also, a synchronous thermal analysis of the MPSP samples was carried out using a synchronous thermal analysis STA 449 F3 Jupiter with a quadrangular mass spectrometer QMC 409C Aeolos, which is a combined TGA/DSC/CTA analyzer, the results for one of the samples are presented in Figure 3.

The firing of the MPSP samples (after preliminary drying) was carried out in a muffle furnace at a temperature of 950°C (the required firing temperature was determined based on the results of thermal analysis). An average sample of MPSP, dried to a constant weight, was used for firing. A photograph of the MPSP after firing is shown in Figure 1c. The results of X-ray phase analysis of the MPSP after firing are presented in Table 2.

The activity of the MPSP after firing was determined according to the methods of GOST 30744-2001 and GOST 22688-2018. When determining the activity of materials, a plastic solution (the normal density of which was determined according to the method of GOST 310.4-81) was prepared

смешивания вяжущего с нормальным песком по ГОСТ 6139-2020. Раствор изготавливали в лабораторном смесителе AUTOMORTAR MIXER E093 с автоматическим режимом перемешивания. Из пластичного раствора нормальной густоты в металлических формах изготавливались образцы-балочки призматического сечения размером 40×40×160 мм для испытания на изгиб и образцы-кубы размером 30×30×30 мм для испытания на сжатие. Уплотнение растворов производилось на лабораторной виброплощадке MATEST. Выдерживание образцов всех составов производилось в нормально-влажностных условиях в камере нормального твердения при температуре воздуха 20–25 °С и относительной влажности воздуха 90–95%.

by mixing the binder with normal sand according to GOST 6139-2020. The solution was prepared in a laboratory mixer AUTOMORTAR MIXER E093 with automatic mixing mode. From a plastic solution of normal density, beam samples of prismatic cross-section measuring 40×40×160 mm were made in metal forms for bending tests and cube samples measuring 30×30×30 mm for compression tests. The compaction of the solutions was carried out on a MATEST laboratory vibration platform. The samples of all compositions were cured under normal humidity conditions in a normal curing chamber at an air temperature of 20–25 °C and a relative air humidity of 90–95%.

ТАБЛИЦА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕНТГЕНОФАЗОВОГО АНАЛИЗА ПРОБ МПСП ПОСЛЕ ОБЖИГА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 950°С

Table 2. Results of X-ray phase analysis of MPSP samples after roasting at 950°C

| Наименование минерала и его химическая формула Name of the mineral and its chemical formula | Количественное содержание, % Quantitative content, % |
|---|--|
| Lime CaO | 58 – 60 |
| Anhydrite CaSO ₄ | 5 – 6 |
| Periclase MgO | 10 – 12 |
| Calcite CaCO ₃ | 2 – 3 |
| C2S alpha Ca ₂ SiO ₄ | 0,5 – 1 |
| C2S beta Ca ₂ SiO ₄ | 12 – 14 |
| Halite NaCl | 1 – 2 |
| C2AS Gehlenite Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ | 4 – 5 |
| C3S triclinic Ca ₃ SiO ₅ | 3 – 4 |

Испытание образцов материалов по показателям «прочность на изгиб» и «прочность на сжатие» производилось по стандартной методике ГОСТ 310.4-81 с использованием гидравлического пресса ПГМ-500МГ4 после 3, 7 и 28 суток нормального твердения (далее н.т.), а также после тепловлажностной обработки при 80–90 °С. Результаты испытаний показали, что гидравлическая активность МПСП в возрасте 28 сут. не превышает 5 МПа.

Из всех видов металлургических шлаков, имеющих хорошую транспортную доступность от промышленных центров Республики Башкортостан, был выбран шлак доменный молотый гранулированный ПАО «Челябинский металлургический комбинат», поставляемый ООО «Мечел-Материалы» в виде добавки минеральной активной GreenCems GGBS-450 (ТУ 38.32.22-012-99126491-2017). Активная минеральная добавка GreenCems GGBS-450 представляет собой сухой мелкодисперсный порошок светло-серого цвета, и согласно требованиям ТУ, должна иметь удельную поверхность не менее 4800 см³/г, прочность на сжатие в возрасте 28 суток нормального твердения – не менее 8 МПа.

Рентгенофазовый анализ пробы добавки минеральной активной GreenCems GGBS-450 был проведен в лаборатории Архитектурно-строительного института УГНТУ с использованием рентгеновского дифрактометра BRUKER D2, представлен в таблице 3.

Активность молотого доменного гранулированного шлака определялась также по методике ГОСТ 30744-2001, в результате было установлено, что он является медленнотвердеющим материалом: прочность на сжатие в возрасте 7 суток н.т. составляет около 5 МПа, а в возрасте 28 суток н.т. – 15 МПа.

Testing of material samples for the indicators “flexural strength” and “compressive strength” was carried out according to the standard method of GOST 310.4-81 using a PGM-500MG4 hydraulic press after 3, 7 and 28 days of normal hardening (hereinafter n.t.), as well as after heat and moisture treatment at 80–90 °C. The test results showed that the hydraulic activity of the MPSP at the age of 28 days does not exceed 5 MPa.

Of all the types of metallurgical slags available within good transport accessibility from the industrial centers of the Republic of Bashkortostan, the granulated blast furnace slag of Chelyabinsk Metallurgical Plant PJSC, supplied by Mechel-Materials LLC in the form of an active mineral additive GreenCems GGBS-450 (TU 38.32.22-012-99126491-2017), was selected. The active mineral additive GreenCems GGBS-450 is a dry finely dispersed powder of light gray color, and according to the requirements of the technical specifications, it must have a specific surface area of at least 4800 cm³/g, and a compressive strength at the age of 28 days of normal hardening of at least 8 MPa.

X-ray phase analysis of a sample of the mineral active additive GreenCems GGBS-450 was carried out in the laboratory of the Architectural and Construction Institute of Ufa State Petroleum Technological University using a BRUKER D2 X-ray diffractometer and is presented in Table 3.

The activity of ground blast-furnace granulated slag was also determined using the GOST 30744-2001 method, as a result of which it was established that it is a slowly hardening material: the compressive strength at the age of 7 days n.t. is about 5 MPa, and at the age of 28 days n.t. – 15 MPa.

ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РФА ДОБАВКИ МИНЕРАЛЬНОЙ АКТИВНОЙ GREENCEMSGGBS-450 НА ОСНОВЕ ШЛАКА МОЛОТОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ДОМЕННОГО ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

Table 3. Results of X-ray phase analysis of mineral active additive GreenCemsGGBS-450 based on ground granulated blast furnace slag of Chelyabinsk Metallurgical Plant

| Наименование минерала и его химическая формула Name of the mineral and its chemical formula | Количественное содержание, % Quantitative content, % |
|--|---|
| C3S monoclinic (NISHI) Ca_3SiO_5 | 12,0 – 12,5 |
| C3S rhombohedric (NISHI) Ca_3SiO_5 | 7,0 – 8,0 |
| C3S triclinic (BELOV) Ca_3SiO_5 | 5,0 – 6,0 |
| Anhydrite CaSO_4 | 14,0 – 15,0 |
| Gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 9,0 – 10,0 |
| Microclinemaximum KAlSi_3O_8 | 4,0 – 5,0 |
| C2S alpha (MUMME) Ca_2SiO_4 | 0,5 – 0,8 |
| C2S beta (MUMME) Ca_2SiO_4 | 3,2 – 3,5 |
| C2AS Gehlenite $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ | 40,0 – 45,0 |

Подготовка исходных сырьевых компонентов и изготовление известково-шлакового вяжущего производилось в следующей последовательности:

- предварительное измельчение минерального продукт содового производства (после обжига при температуре 950°C) до фракции 0–5мм;

- совместные помол измельченного обожженного МПСР с молотым гранулированным доменным шлаком в лабораторной шаровой мельнице до остатка на сите № 0,08 мм не более 5 % по массе.

Эксперименты и обсуждение результатов

Определение гидравлической активности полученного известково-шлакового вяжущего проводилось по методике ГОСТ 30744-2001. Пластичный раствор приготавливался путем смешивания вяжущего с нормальным (полифракционным) песком по ГОСТ 6139-2020 в соотношении 1:3. Раствор изготавливали в лабораторном смесителе AUTOMORTAR MIXER E093 с автоматическим режимом перемешивания. Нормальная густота пластичного раствора определялась по методике ГОСТ 310.4-8 с использованием встряхивающего столика. Водоцементное отношение, полученное при распыле конуса 106–115 мм, принимали для проведения дальнейших исследований. Из пластичного раствора нормальной густоты в металлических формах изготавливались образцы-балочки призматического сечения размером 40×40×160 мм для испытания на изгиб (с последующим испытанием половинок балочек на сжатие) и образцы-кубы размером 30×30×30 мм для испытания на сжатие с уплотнением на лабораторной виброплощадке МАТЕСТ. Выдерживание образцов всех вяжущих производилось в нормально-влажностных условиях в камере нормального твердения при температуре воздуха 20–25 °С и относительной влажности воздуха 90–95 %. Испытание образцов вяжущих по показателям «прочность на изгиб» и «прочность на сжатие» производилось по стандартной методике ГОСТ 310.4-81 с использованием гидравлического пресса П-10 после 7 и 28 суток нормального твердения.

Как видно из результатов исследований (см. таблицу 1), минералогический состав исходного МПСР представлен преимущественно карбонатом кальция CaCO_3 (от 48 до 62 %), также присутствуют карбонатные минералы моногидрокальцит $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ в количестве от 2 до 4,5 %, магнезиальный кальцит $(\text{Mg}_{0,03}\text{Ca}_{0,97})(\text{CO}_3)$ в

The preparation of the initial raw materials and the production of lime-slag binder were carried out in the following sequence:

- preliminary grinding of mineral products from soda production (after firing at a temperature of 950°C) to a fraction of 0–5 mm;

- joint grinding of crushed fired MPSP with ground granulated blast furnace slag in a laboratory ball mill until the residue on sieve No. 0.08 mm is no more than 5% by weight.

Experiments and discussion of results

The hydraulic activity of the obtained lime-slag binder was determined according to the GOST 30744-2001 method. The plastic solution was prepared by mixing the binder with normal (polyfractional) sand according to GOST 6139-2020 in a ratio of 1:3. The solution was prepared in a laboratory mixer AUTOMORTAR MIXER E093 with automatic mixing mode. The normal density of the plastic solution was determined according to the GOST 310.4-8 method using a shaking table. The water-cement ratio obtained with a cone spread of 106–115 mm was adopted for further research. From a plastic solution of normal density, beam samples of prismatic cross-section measuring 40×40×160 mm were made in metal forms for bending tests (with subsequent compression testing of the beam halves) and cube samples measuring 30×30×30 mm for compression tests with compaction on a МАТЕСТ laboratory vibration platform. The samples of all binders were cured under normal humidity conditions in a normal curing chamber at an air temperature of 20–25 °C and a relative air humidity of 90–95%. Testing of binder samples for the parameters “flexural strength” and “compressive strength” was carried out according to the standard method of GOST 310.4-81 using a P-10 hydraulic press after 7 and 28 days of normal hardening.

As can be seen from the research results (see Table 1), the mineralogical composition of the original MPSP is represented mainly by calcium carbonate CaCO_3 (from 48 to 62%), also present are carbonate minerals monohydrocalcite $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ in an amount from 2 to 4.5%, magnesian calcite $(\text{Mg}_{0,03}\text{Ca}_{0,97})(\text{CO}_3)$ in an amount from 1.2 to 5%, magnesite MgCO_3 in an amount from 0 to 3.3%. The content of calcium and magnesium hydroxides $(\text{CaO} + \text{MgO})_{\text{act}}$ is in the range from 5 to 8%, but the content of MgO exceeds the content of CaO. It should also be noted that there is a fairly significant

количестве от 1,2 до 5 %, магнезит $MgCO_3$ в количестве от 0 до 3,3 %. Содержание гидроксидов кальция и магния $(CaO + MgO)_{акт}$ находится в пределах от 5 до 8%, но при этом содержание MgO превышает содержание CaO . Также следует отметить наличие достаточно значительное содержание двуводного $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ и полуводного $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ гипса (в сумме от 10 до 15%).

По результатам рентгенофазового анализа МПСР после обжига при температуре 950 °C установлено, что общее содержание свободных оксидов $(CaO + MgO)_{акт}$ составляет около 70%, из них свободного оксида кальция CaO – 58–60 %, свободного оксида магния MgO – 10–12%, что значительно выше допустимых значений для извести согласно ГОСТ 9179-2018. В составе присутствуют также цементные минералы – двухкальциевый силикат C_2S в количестве 12–14%, и трехкальциевый силикат C_3S в количестве (3–4%), а также ангидрит $CaSO_4$ в количестве 5–6%. Минералогический состав МПСР после обжига показывает возможность его использования в качестве аналога извести третьего сорта согласно ГОСТ 9179-77.

Минералогический состав активной минеральной добавки GreenCems GGBS-450 на основе гранулированного доменного шлака – отхода Челябинского металлургического комбината – представлен в основном трехкальциевым силикатом C_3S (25 %) и двухкальциевым алюмосиликатом C_2AS (40–45 %), содержание двухкальциевого силиката C_2S незначительно (не превышает 5–10%). Также имеется значительное количество ангидрита $CaSO_4$ – 14–15 % и двуводного гипса $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ – 9–10 %, которые были добавлены к гранулированному доменному шлаку на этапе изготовления активной минеральной добавки. Минералогический состав и достаточно высокая гидравлическая активность минеральной добавки GreenCems GGBS-450 даёт возможность применять ее в качестве активной минеральной добавки при производстве бетонных и растворных смесей, а также сборного железобетона [21], и в качестве компонента комплексных бесцементных и малоцементных вяжущих (в т.ч. известково-шлакового, сульфатно-шлакового и др.) [18].

Экспериментальные исследования активности гидравлического известково-шлакового вяжущего с целью подбора его оптимальной рецептуры выполнялись путем совместного помола предварительно измельченного МПСР (после обжига при температуре 950 °C) с металлургическим молотым шлаком в следующих пропорциях:

- МПСР – 40 %, шлак – 60 %;
- МПСР – 50 %, шлак – 50 %;
- МПСР – 67 %, шлак – 33,3 %
- МПСР – 75 %, шлак – 25 %.

Результаты испытаний образцов комплексного вяжущего в возрасте 7 и 28 суток нормального твердения представлены в таблице 4.

Как видно из результатов испытаний, активность комплексного бесцементного известково-шлакового вяжущего при соотношении МПСР : доменный гранулированный шлак Челябинского металлургического комбината в пределах от 2:3 до 3:1 в возрасте 28 суток составляет от 15 до 21 МПа, т.е. разработанные комплексные вяжущие в зависимости от соотношения компонентов соответствуют маркам по прочности на сжатие М150

content of dihydrate $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ and hemihydrate $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ gypsum (in total from 10 to 15%).

According to the results of X-ray phase analysis of the MPSP after firing at a temperature of 950 °C, it was found that the total content of free oxides $(CaO + MgO)_{акт}$ is about 70%, of which free calcium oxide CaO is 58–60%, free magnesium oxide MgO is 10–12%, which is significantly higher than the permissible values for lime according to GOST 9179-2018. The composition also includes cement minerals – dicalcium silicate C_2S in the amount of 12–14%, and tricalcium silicate C_3S in the amount of (3–4%), as well as anhydrite $CaSO_4$ in the amount of 5–6%. The mineralogical composition of MPSP after firing shows the possibility of its use as an analogue of third-grade lime according to GOST 9179-77.

The mineralogical composition of the active mineral additive GreenCems GGBS-450 based on granulated blast furnace slag – waste from the Chelyabinsk Metallurgical Plant – is represented mainly by tricalcium silicate C_3S (25%) and dicalcium aluminosilicate C_2AS (40–45%), the content of dicalcium silicate C_2S is insignificant (does not exceed 5–10%). There is also a significant amount of anhydrite $CaSO_4$ – 14–15% and dihydrate gypsum $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ – 9–10%, which were added to the granulated blast furnace slag at the stage of manufacturing the active mineral additive. The mineralogical composition and sufficiently high hydraulic activity of the mineral additive GreenCems GGBS-450 make it possible to use it as an active mineral additive in the production of concrete and mortar mixtures, as well as precast reinforced concrete [21], and as a component of complex cement-free and low-cement binders (including lime-slag, sulfate-slag, etc.) [18].

Experimental studies of the activity of hydraulic lime-slag binder with the aim of selecting its optimal formulation were carried out by jointly grinding pre-crushed MPSP (after firing at a temperature of 950 °C) with ground metallurgical slag in the following proportions:

- MPSP – 40%, slag – 60%;
- MPSP – 50%, slag – 50%;
- MPSP – 67%, slag – 33.3%
- MPSP – 75%, slag – 25%.

The results of testing samples of complex binder at the age of 7 and 28 days of normal hardening are presented in Table 4.

As can be seen from the test results, the activity of the complex cement-free lime-slag binder with a ratio of MPSP: blast-furnace granulated slag of the Chelyabinsk Metallurgical Plant in the range from 2:3 to 3:1 at the age of 28 days is from 15 to 21 MPa, i.e. the developed complex binders, depending on the ratio of components, correspond to the compressive strength grades M150 and M200. When adding 10% Portland cement to the lime-slag binder, the strength of the binder at the age of 28 days n.t. increases to 22–24 MPa, i.e. the developed complex mineral binder for soil strengthening corresponds to class 22.5N in accordance with GOST R 70196-2022.

и М200. При добавлении к известково-шлаковому вяжущему 10% портландцемента прочность вяжущего в возрасте 28 суток н.т. возрастает до 22–24МПа, т.е. разработанное комплексное минеральное вяжущее для укрепления грунтов соответствует классу 22,5Н в соответствии с ГОСТ Р 70196-2022.

ТАБЛИЦА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ КОМПЛЕКСНОГО ИЗВЕСТКОВО-ШЛАКОВОГО ВЯЖУЩЕГО НА ОСНОВЕ МПСЦ

Table 4. Test results of samples of complex lime-slag binder on the basis of MPSP

| Соотношение компонентов, % Component ratio, % | | | Прочность при сжатии, МПа (среднее значение по результату трех серий испытаний) Compressive strength, MPa (average value based on the results of three series of tests) | |
|--|------|---------------|--|--|
| Портландцемент Щ I 52,5Н | МПСЦ | Доменный шлак | Прочность на сжатие после 7 суток н.т., МПа | Прочность на сжатие после 28 суток н.т., МПа |
| - | 40 | 60 | 10,5 | 17,4 |
| - | 50 | 50 | 9,2 | 21,1 |
| - | 67 | 33 | 4,8 | 14,6 |
| - | 75 | 25 | 4,5 | 10,7 |
| 10 | 35 | 55 | 12,8 | 22,6 |
| 10 | 45 | 45 | 12,5 | 23,4 |

На вяжущее были разработаны Технические условия ТУ 23.51.12-001-02069450-2022 «Вяжущее гидравлическое известково-шлаковое на основе минерального продукта содового производства. Технические условия», согласно данному документу комплексное известково-шлаковое минеральное вяжущее предназначено в качестве вяжущего материала для укрепления грунтов в дорожном строительстве, а также для изготовления низкомарочных бетонов и растворов, применяемых в гражданском, промышленном и дорожном строительстве, а также для укрепления грунтов. Технические условия устанавливают технические требования, правила приемки, упаковки, маркировки, транспортирования и хранения комплексного минерального вяжущего.

Заключение

Одним из возможных путей снижения материалоемкости и экономии природных каменных материалов при строительстве автомобильных дорог является использование грунтов, укрепленных минеральными вяжущими. На основе вторичных ресурсов Урало-Поволжского региона – минерального продукта содового производства после обжига при температуре 950 °С и доменного гранулированного шлака разработано комплексное минеральное вяжущее, характеризующееся прочностью на сжатие 22–24 МПа в возрасте 28 суток нормального твердения, что соответствует классу 22,5Н по ГОСТ Р 70196-2022. Разработанное вяжущее может использоваться для укрепления связных и несвязных грунтов (песков, супесей и суглинков) при устройстве слоев оснований автомобильных дорог, а также для укрепления грунта рабочего слоя земляного полотна.

Литература:

1. Безродных А.А. Терминологические аспекты укрепления грунтов / А.А. Безродных, В.В. Нелюбова, В.В. Строкова [и др.] // Инженерные задачи: проблемы и пути решения: Сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции Высшей инженерной школы САФУ, 20 ноября 2019 года / Составители М.В. Морозова, С.Е. Аксенов. – Архангельск: Северный, 2019. – С. 66-68.

Technical specifications TU 23.51.12-001-02069450-2022 “Hydraulic lime-slag binder based on a mineral product of soda production” were developed for the binder. Technical conditions». According to this document, the complex lime-slag mineral binder is intended as a binder for strengthening soils in road construction, as well as for the production of low-grade concretes and mortars used in civil, industrial and road construction, as well as for strengthening soils. Technical conditions establish technical requirements, rules for acceptance, packaging, labeling, transportation and storage of complex mineral binders.

Conclusion

One of the possible ways to reduce material consumption and save natural stone materials in the construction of highways is to use soils reinforced with mineral binders. Based on secondary resources of the Ural-Volga region - a mineral product of soda production after firing at a temperature of 950 °C and blast furnace granulated slag, a complex mineral binder has been developed, characterized by a compressive strength of 22-24 MPa at the age of 28 days of normal hardening, which corresponds to class 22.5N according to GOST R 70196-2022. The developed binder can be used to strengthen cohesive and non-cohesive soils (sand, sandy loam and loam) when constructing foundation layers for motorways, as well as to strengthen the soil of the working layer of the roadbed.

References:

1. Bezrodnykh A.A. Terminological aspects of soil strengthening / A.A. Bezrodnykh, V.V. Nelyubova, V.V. Strokovaya [et al.] // *Engineering problems: problems and solutions: Collection of materials of the All-Russian (national) scientific-practical conference of the Higher Engineering School of SAFU*, 20 November 2019 / Compiled by M.V. Morozova, S.E. Aksenov. – Arkhangelsk: Northern, 2019. – Pp. 66-68 (in Russian).

2. Марков, А.Ю. Свойства топливных зол различных типов как компонентов битумной эмульсии / А.Ю. Марков, В.В. Строкова, А.А. Безродных, М.А. Степаненко // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 2 (88). – С. 67-76. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-88-2-67-76.
3. Лянгасова С. Грунты как основа будущего строительства / С. Лянгасова // Автомобильные дороги. – 2022. – № 10(1091). – С. 59-61.
4. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals / A. Bartolomey, A. Bogomolov, V. Kleveko, A. Ponomarev, V. Ofrikhter // Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. – Amsterdam, Netherlands, 1999. – Vol. 2. – P. 1197–1202.
5. Kozlova, I., Samchenko, S., Zemskova O. Physico-Chemical Substantiation of Obtaining an Effective Cement Composite with Ultrafine GGBS Admixture // Buildings. – 2023. - Vol. 13. - №4., – P. 925. <https://doi.org/10.3390/buildings13040925>.
6. Взаимодействие фосфорного шлака, жидкого стекла и грунта в земляном полотне лесовозных автомобильных дорог / И. А. Викулин, Д. Г. Козлов, Ю. А. Боровлев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 3(63). – С. 84-94.
7. Безрук В.М. Технология и механизация укрепления грунтов в дорожном строительстве / В.М. Безрук, Е.Ф. Левицкий, Л.Н. Ястребова, М.А. Либерман, В.С. Исаев, Л.И. Глухман. - М.: Транспорт, 1976. – 232 с.
8. Корочкин А. В. Проектирование и строительство дорожных одежд с применением цементогрунтов / А.В. Корочкин // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2021. – № 9. – С. 69-72. – DOI 10.36535/0236-1914-2021-09-13.
9. Чуудинов С.А. Укрепление грунтов портландцементом с добавлением модифицированного лигносульфоната / С. А. Чуудинов, Н. В. Ладейщиков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2022. – Т. 1. – С. 338-341.
10. Голубева Е.А. Сокращение эксплуатационных затрат путем применения инновационных материалов отечественного производства / Е. А. Голубева, И. М. Карамышев, Н. Е. Костюков // Мир дорог. – 2018. – № 111. – С. 16-19.
11. Гришин А.Н., Панченко А.И., Харченко И.Я., Баженов М.И. Тонкодисперсное композиционное вяжущее для закрепления грунтов инъекционным способом // Вестник МГСУ. – 2017 - № 12(11). – С.1289-1298.
12. Ларионова Н.А. Влияние поверхностных пленок на эффективность укрепления песчаных грунтов неорганическими вяжущими / Н. А. Ларионова // Инженерная геология. – 2022. – Т. 17, № 1. – С. 20-32. – DOI 10.25296/1993-5056-2022-17-1-20-32.
13. Слободчикова Н.А. Научные основы подбора состава грунтов, укрепленных известью / Н. А. Слободчикова // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 62-68.
14. Шеломенцев С.В. Улучшение свойств грунтов с помощью модификаторов / С. В. Шеломенцев, В. А. Репринцев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 1. – С. 315-326.
15. Кривобородов Ю.Р., Козлова И.В., Земскова О.В., Борисенков Н.С. Разработка цементных композиций с тонкодисперсным перлитом для инъекционного закрепления грунтов // Техника и технология силикатов. – 2023. – Т. 30, №3. – С. 272 – 280.
16. Бавбель Е.И. Разработка состава малоцементного композиционного вяжущего для укрепления местных дорожных грунтов / Е. И. Бавбель, А. И. Наumenko, М. В. Жилинский // Sciences of Europe. – 2018. – № 31-1(31). – С. 43-46.
17. Использование отходов производства кальцинированной соды для получения известьесодержащих вяжущих и строительных материалов на их основе / А. А. Оратовская, Д. А. Синицин, Л. Ш. Галеева [и др.] // Строительные материалы. – 2012. – № 2. – С. 52-53.
2. Markov A.Yu. Properties of fuel ashes of different types as components of bitumen emulsion / A.Yu. Markov, V.V. Strokovaya, A.A. Bezrodnykh, M.A. Stepanenko // *Stroitel'stvo i rekonstrukcia*. – 2020. – No. 2 (88). – Pp. 67-76. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-88-2-67-76 (in Russian).
3. Lyangasova, S. Soils as a basis for future construction / S. Lyangasova // *Avtomobil'nye dorogi*. – 2022. – No. 10(1091). – Pp. 59-61 (in Russian).
4. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals / A. Bartolomey, A. Bogomolov, V. Kleveko, A. Ponomarev, V. Ofrikhter // Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. – Amsterdam, Netherlands, 1999. – Vol. 2. – P. 1197–1202.
5. Kozlova, I., Samchenko, S., Zemskova O. Physico-Chemical Substantiation of Obtaining an Effective Cement Composite with Ultrafine GGBS Admixture // Buildings. – 2023. - Vol. 13. - №4., – P. 925. <https://doi.org/10.3390/buildings13040925>.
6. Interaction of phosphorus slag, liquid glass and soil in the subgrade of forest roads / I. A. Vikulin, D. G. Kozlov, Y. A. Borovlev [et al] // *Systems. Methods. Technologies*. – 2024. – No. 3(63). – Pp. 84-94 (in Russian).
7. Bezruk V.M. Technology and mechanisation of soil strengthening in road construction / V.M. Bezruk, E.F. Levitsky, L.N. Yastrebova, M.A. Liberman, V.S. Isaev, L.I. Glukhman. – Moscow: *Transport*, 1976. – P. 232 (in Russian).
8. Korochkin, A.V. Design and construction of road pavements with the use of cement-soil / A.V. Korochkin // *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*. Scientific information collection. – 2021. – No. 9. – Pp. 69-72. – DOI 10.36535/0236-1914-2021-09-13 (in Russian).
9. Chudinov, S.A. Strengthening of soils with Portland cement with the addition of modified lignosulfonate / S.A. Chudinov, N.V. Ladeyshchikov // *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse*. – 2022. – Vol. 1. – Pp. 338-341 (in Russian).
10. Golubeva, E. A. Reduction of operating costs by applying innovative materials of domestic production / E. A. Golubeva, I. M. Karamyshev, N. E. Kostyukov // *Mir dorog*. – 2018. – No. 111. – Pp. 16-19 (in Russian).
11. Grishin A.N., Panchenko A.I., Kharchenko I.Ya., Bazhenov M.I. Fine-dispersed composite binder for consolidating soils using the injection method // *Bulletin of MGSU*. – 2017 – № 12(11). – P.1289-1298.
12. Larionova, N.A. Influence of surface films on the effectiveness of strengthening sandy soils with inorganic binders / N.A. Larionova // *Engineering Geology*. – 2022. – Vol. 17, No. 1. – Pp. 20-32. – DOI 10.25296/1993-5056-2022-17-1-20-32 (in Russian).
13. Slobodchikova, N.A. Scientific basis for selecting the composition of soils reinforced with lime / N.A. Slobodchikova // *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. – 2017. – Vol. 3, No. 4. – Pp. 62-68 (in Russian).
14. Shelomentsev, S.V. Improvement of soil properties with the help of modifiers / S.V. Shelomentsev, V.A. Reprintsev // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. – 2019. – No. 1. – Pp. 315-326 (in Russian).
15. Krivoborodov Y.R., Kozlova I.V., Zemskova O.V., Borisenkov N.S. Development of cement compositions with fine perlite for injection fixing of soils// *Technique and technology of silicates*. – 2023. Vol. 30, No3. – Pp. 272 – 280.
16. Bavbel, E. I. Development of the composition of low-cement composite binder for strengthening local road soils / E. I. Bavbel, A. I. Naumenko, M. V. Zhilinsky // *Sciences of Europe*. –2018. – No. 31-1(31). – Pp. 43-46 (in Russian).
17. Use of soda ash production waste for lime-containing binders and building materials on their basis / A. A. Oratovskaya, D. A. Sinitin, L. Sh. Galejeva [et al.] // *Stroitel'nye Materialy*. – 2012. – No. 2. – Pp. 52-53 (in Russian).

18. Анализ состава, свойств и перспективы применения минерального продукта содового производства АО «Башкирская содовая компания» для изготовления энергоэффективных вяжущих / С.Л. Мамулат, В.В. Бабков, Э.М. Давыдов [и др.] // Строительные материалы. – 2022. – № 3. – С. 61-73. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-800-3-61-73.
19. Джандуллаева, М. С. Физико-механические свойства силикатных материалов на основе твердых отходов содового производства / М. С. Джандуллаева, Т. А. Атакузиев // Химическая промышленность. – 2017. – Т. 94, № 1. – С. 31-33. – EDN YMIGDB.
20. Твердые отходы содового производства - важный резерв расширения сырьевой базы получения извести и низкоэнергетических бесклинкерных вяжущих на ее основе / А.Н. Рязанов, Д.А. Синицин, Г.Ю. Шагигалин [и др.] // Строительные материалы. – 2020. – № 4-5. – С. 14-17. – DOI 10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-14-17.
21. Композиционные материалы для дорожного строительства на основе отходов химической и металлургической промышленности / В. В. Бабков, И. В. Недосеко, А. О. Глазачев [и др.] // Строительные материалы. – 2023. – № 1-2. – С. 88-94. – DOI 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-88-94.
18. Analysis of composition, properties and prospects of application of mineral product of soda production of JSC 'Bashkir Soda Company' for the manufacture of energy-efficient binders / S.L. Mamulat, V.V. Babkov, E.M. Davydov [et al. Babkov, E.M. Davydov [et al.] // *Stroitel'nye Materialy*. – 2022. – No. 3. – Pp. 61-73. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-800-3-61-73 (in Russian).
19. Dzhandullaeva, M. S. Physical and mechanical properties of silicate materials based on solid waste of soda production / M. S. Dzhandullaeva, T. A. Atakuziev // *Chemical Industry*. - 2017. - T. 94, № 1. - С. 31-33. - EDN YMIGDB. (in Russian).
20. Solid wastes of soda production - an important reserve for expanding the raw material base for lime and low-energy-intensive clinker-free binders on its basis / A.N. Ryazanov, D.A. Sinitsin, G.Y. Shagigalin [et al] // *Stroitel'nye Materialy*. – 2020. – No. 4-5. – Pp. 14-17. – DOI 10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-14-17 (in Russian).
21. Composite materials for road construction based on wastes of chemical and metallurgical industries / V. V. Babkov, I. V. Nedoseko, A. O. Glazachev [et al] // *Stroitel'nye Materialy*. – 2023. – No. 1-2. – Pp. 88-94. – DOI 10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-88-94 (in Russian).

Работа выполнена в рамках участия ФГБОУ ВО «УГНТУ» в программе развития «Приоритет-2030».

Парфенова Анастасия Александровна – аспирант кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». E-mail: nastya10092011@mail.ru.

Синицин Дмитрий Александрович – заведующий кафедрой «Строительные конструкции», кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». E-mail: d4013438@yandex.ru.

Глазачев Антон Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». E-mail: anton.glazachev@mail.ru.

Синицина Екатерина Александровна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». E-mail: sinitsina.katy@yandex.ru.

Недосеко Игорь Вадимович – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». E-mail: nedoseko1964@mail.ru (автор для связи).

Вклад авторов: Синицин Д.А. - идея, научное руководство, научное редактирование статьи; Глазачев А.О., Синицина Е.А. – разработка методик, обработка материала, написание статьи; Недосеко И.В. – идея, научное руководство, обработка материала, написание статьи; Парфенова А.А. – разработка методик, обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Parfenova Anastasia Aleksandrovna – postgraduate student of the Department of Building Structures of the Ufa State Petroleum Technological University. E-mail: nastya10092011@mail.ru.

Sinitsin Dmitry Aleksandrovich – Head of the Chair of the Department of Building Structures, candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures of the Ufa State Petroleum Technological University. E-mail: d4013438@yandex.ru.

Glazachev Anton Olegovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Roads, Bridges and Transport Structures F of the Ufa State Petroleum Technological University. E-mail: anton.glazachev@mail.ru.

Sinitsina Ekaterina Aleksandrovna – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Building Structures of the Ufa State Petroleum Technological University. E-mail: sinitsina.katy@yandex.ru.

Nedoseko Igor Vadimovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Structures of the Ufa State Petroleum Technological University. E-mail: nedoseko1964@mail.ru (author for contact).

Contribution of the author: Sinitsin D.A. – idea, scientific leadership, scientific editing of the article; Glazachev A.O., Sinitsina E.A. – development of methods, processing of material, writing an article; Nedoseko I.V. – idea, scientific guidance, material processing, article writing; Parfenova A.A. – development of methods, processing of material, writing an article.

The authors declare that there is no conflict of interest.