

УДК: 625.7/8; 691.3
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.24
EDN: STQCKD



Геополимерное вяжущее на основе отходов сталелитейного производства для дорожного строительства

Е.А. Вдовин¹, В.Ф. Строганов¹, П.Е. Буланов¹, Б.К. Хусаенов², Э.И. Загидуллин³

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

²ООО «Спецдорпроект», г. Казань, Российская Федерация

³ООО «СТРОЙДОРТЕХНОЛОГИЯ», г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* В связи с возрастающими нормативными требованиями для грунтов рабочего слоя земляного полотна автомобильных дорог расширяется применение технологии стабилизации грунтов в дорожном строительстве. Однако, производство основных вяжущих (известь, портландцемент), используемых в данной технологии, характеризуется чрезмерным потреблением энергии и ресурсов, а также отрицательным влиянием на окружающую среду. Актуальным является разработка технологий стабилизации и укрепления грунтов с использованием в качестве вяжущих отходов сталелитейного производства, разрабатываемых на основе щелочной модификации. Цель работы заключается в разработке геополимерного вяжущего на основе отходов сталелитейного производства для дорожного строительства. Для достижения цели решались следующие задачи: исследование влияния натриевых и калиевых щелочей на прочностные показатели геополимерных материалов с применением вяжущих на основе отхода сталелитейного производства; определение оптимального содержания калиевых и натриевых щелочей для активации отхода; исследование влияния сроков твердения на прочностные характеристики геополимерных материалов.

Результаты. Установлено, что активация отхода сталелитейного производства гидроксидом натрия оказывает влияние на максимальный прирост прочности в 3,5 раза при оптимальном отношении 96/4 вяжущее/активатор, обусловленный созданием в агрессивных условиях высокощелочного синтеза гелеобразных продуктов N-A-S-H, N-S-H, K-A-S-H с вяжущими характеристиками трехмерного каркаса. Полученные результаты являются предпосылкой для дальнейшего исследования геополимерных вяжущих, в том числе в составе глинистых грунтов для дорожного строительства

Выводы. Значимость для дорожно-строительной отрасли заключается в повышении технико-экономической эффективности строительства автомобильных дорог за счет поиска и разработки новых экологичных, экономичных типов бесклинкерных вяжущих, особенно на основе вторичного использования отходов производств.

Ключевые слова: геополимер, активатор, вяжущее, отход сталелитейного производства, предел прочности на сжатие

Для цитирования: Вдовин Е.А., Строганов В.Ф., Буланов П.Е., Хусаенов Б.К., Загидуллин Э.И. Геополимерное вяжущее на основе отходов сталелитейного производства для дорожного строительства // Известия КГАСУ, 2024, № 4(70), с. 275-284, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.24, EDN: STQCKD

Geopolymer binder based on steel production waste for road construction

E.A. Vdovin¹, V.F. Stroganov¹, P.E. Bulanov¹, B.K. Khusaenov², E.I. Zagidullin³

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

²LLC “Spetsdorproekt”, Kazan, Russian Federation

³LLC “STROIDORTEKHNLOGIYA”, Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* Due to increasing regulatory requirements for soils in the working layer of highway subgrades, the use of soil stabilization technology in road construction is expanding. However, the production of the main binders (lime, Portland cement) used in this technology is characterized by excessive consumption of energy and resources, as well as negative impact on the environment. It is relevant to develop technologies for stabilizing and strengthening soils using steel production waste, developed on the basis of alkaline modification as a binder. The purpose of the work is to develop a geopolymer binder based on steel production waste for road construction. To achieve the goal, the following tasks were solved: study of the influence of sodium and potassium alkalis on the strength properties of geopolymer materials using binders based on steel production waste; determination of the optimal content of potassium and sodium alkalis for waste activation; study of the influence of hardening time on the strength properties of geopolymer materials.

Results. It has been established that the activation of steel production waste with sodium hydroxide affects the maximum increase in strength by 3.5 times at an optimal ratio of 96/4 binder/activator, due to the creation under aggressive conditions of highly alkaline synthesis of gel-like products N-A-S-H, N-S-H, K-A-S-H with the binding characteristics of a three-dimensional frame. The results obtained are a prerequisite for further research of geopolymer binders, including in the composition of clay soils for road construction

Conclusions: The significance for the road construction industry lies in increasing the technical and economic efficiency of highway construction through the search for and development of new environmentally friendly, economical types of clinker-free binders, especially based on the recycling of industrial waste.

Keywords: geopolymer, activator, binder, steel production waste, compressive strength

For citation: Vdovin E.A., Stroganov V.F., Bulanov P.E., Khusaenov B.K., Zagidullin E.I. Geopolymer binder based on steel production waste for road construction // News of KSUAE, 2024, № 4(70), p. 275-284, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.24, EDN: STQCKD

1. Введение

Увеличение интенсивности движения автомобильного потока на автомобильных дорогах, особенно большегрузного транспорта, является причиной повышенной нагрузки на конструктивные слои дорожных одежд и грунтовых оснований, приводящей к разрушению покрытий и снижению сроков службы дорожного полотна [1]. В связи с этим возрастают нормативные показатели [2-4] как для каждого отдельного конструктивного элемента, так и для дорожной конструкции в целом [5-7]. В методике расчета нежестких дорожных одежд по ГОСТ Р 71404 п. 6.13 нормируются минимальные значения модулей упругости для рабочего слоя земляного полотна. Применение грунта в естественном виде осложняется [8, 9], особенно во II и III дорожно-климатических зонах, из-за недостаточно высокой несущей способности и невозможности обеспечения требуемого модуля упругости. Для решения данной проблемы в дорожном строительстве при неблагоприятных грунтово-геологических условиях в регионе рекомендуется применение технологии стабилизации рабочего слоя земляного полотна [10-11].

Наиболее распространенным вяжущим для стабилизации грунтов является известь и портландцемент. Однако их производство характеризуется чрезмерным потреблением

энергии и ресурсов, а также отрицательным влиянием на окружающую среду: около 8-10 % общемировых выбросов углекислого газа [12, 13]. Данный факт стимулирует разработку новых альтернативных вяжущих, производство которых более экологично, а результат стабилизации грунтов сопоставим или превосходит традиционные методы.

Известно и достаточно широко распространено применение, в качестве вяжущих, отходов промышленного производства (например, зол уноса, шлаков и отходов стекольного производства), предварительно активируемых различными методами. Одним из эффективных способов активации отходов промышленного производства является щелочная модификация [13, 14]. Процесс щелочной активации отходов промышленного производства в стабилизируемых и укрепляемых грунтах включает в себя взаимодействие кремнезема и глинозема с жидкой фазой модификатора (при высоких pH), обеспечивающее формирование новообразований. Этот процесс с участием алюмосиликатных материалов при низком содержании кальция, принято называть геополимеризацией, которая отличается от протекания реакции гидратации портландцемента в грунтовых смесях [14, 15] и может представлять интерес при стабилизации и укреплении грунтов в дорожном строительстве.

Следует отметить, что в результате производственной деятельности человека накапливается большое количество промышленных отходов, представляющих экологическую угрозу [16]. От общей доли загрязнений, выбрасываемых промышленностью в окружающую среду, металлургия занимает первое место с долей 37 %. Электроэнергетика выбрасывает 29 %, а машиностроение в совокупности с нефтехимической промышленностью и лесозаготовительной лишь 9 % от общей массы выбросов. В этой связи проблема загрязнения окружающей среды отходами металлургической промышленности является весьма актуальной. На сегодняшний день наиболее популярным способом утилизации отходов данного вида промышленности является устройство полигонов. В процессе захоронения на полигонах возникает ситуация с их переполнением, а также попаданием вредных веществ в почву и подземные воды. Помимо отходов к твердым отходам металлургической и сталелитейной промышленности относятся еще и пылеобразные вещества, промежуточные и конечные отходы электролиза и коксования анодных материалов. Образуются также и жидкие отходы, которые могут попадать в реки, что в значительной степени неблагоприятно влияет на флору и фауну [16,17].

Учеными изыскиваются способы переработки и повторного использования данного вида отходов в строительной отрасли, в частности при строительстве автомобильных дорог. Состав отходов сталелитейного производства характеризуется наличием оксидов алюминия, кремния, железа, кальция, калия и магния, что является основанием для рассмотрения данного материала в качестве геополимерного вяжущего при стабилизации укрепления грунтов дорожных конструкций [18, 19].

На основе анализа литературы установлено, что вторичное использование отходов сталелитейного производства в качестве основы геополимерных вяжущих является перспективным направлением исследований, а применение разработанных технологий может способствовать повышению технико-экономической эффективности дорожного строительства, а также снижению негативного воздействия на окружающую среду.

В связи с изложенным, целью работы явилась разработка геополимерного вяжущего на основе отходов сталелитейного производства для дорожного строительства.

Для достижения поставленной цели сформулированы задачи:

- Исследование влияния натриевых и калиевых щелочей на прочностные показатели геополимерных материалов с применением вяжущих на основе отхода сталелитейного производства;

- Определение оптимального содержания калиевых и натриевых щелочей для активации отхода сталелитейного производства в составе геополимерного вяжущего;

- Исследование влияния сроков твердения на прочностные характеристики геополимерных материалов с применением вяжущих на основе отхода сталелитейного производства.

2. Материалы и методы

Для основы геополимерного вяжущего использован отход сталелитейного производства. Анализ химического состава методом спектрофотометрии показал высокое содержание диоксида кремния (60,65 %), алюминия (0,18 %), кальция (4710 мг/кг), железа (6860 мг/кг), свинца (2180 мг/кг) и ряда других элементов. В качестве щелочного активатора применены следующие типы щелочей: гидроксид натрия (NaOH), гидроксид калия (KOH), калий серноокислый (K_2SO_4), натрий серноокислый (Na_2SO_4). Производитель АО «ВЕКТОН».

Для проверки реакционной активности компонентов отходов сталелитейного производства в условиях щелочной среды применялись следующие составы вяжущее/активатор, в процентах от массы: 100/0, 99/1, 98/2, 97/3, 96/4, 95/5.

Содержание воды для затворения геополимеров определялось по достижению нормальной густоты жидких вяжущих материалов с использованием прибора Вика (ГОСТ 310.3) для каждого состава геополимера.

Образцы изготавливали в формах размерами 20ммх20ммх20мм Уплотнение и удаление воздушных пустот геополимерного вяжущего производилось при помощи виброплощадки. После уплотнения образцы в формах помещали в эксикатор для обеспечения необходимых условий твердения до проведения испытаний. После выдержки образцов в формах в течении 24 часов производилась распалубка. Для определения влияния времени твердения на прочность геополимеров, образцы выдерживали в течении 28 и 56 суток в камере нормального твердения.

Определение предела прочности на сжатие геополимерных вяжущих производилось после водонасыщения образцов в течении 2 суток. Возраст образцов на момент проведения испытаний составлял 28 и 56 суток.

3. Результаты и обсуждение

Установлено, что введение гидроксида натрия и гидроксида калия в отношении 100/0-95/5 вяжущее/активатор уменьшает водопотребность смеси с 0,25 до 0,18. При использовании в качестве активаторов калия серноокислого и кальция серноокислого водопотребление смеси растёт с 0,25 до 0,30.

Установлено, что активация отхода сталелитейного производства гидроксидом натрия оказывает наибольшее воздействие на конечный продукт – геополимерное вяжущее. Следует отметить, что максимальный прирост прочности достигается в сравнении с неактивированным вяжущим в 28 и 56 суток в 3,47 и 3,36 раза соответственно при оптимальном отношении 96/4 вяжущее/активатор. В составе 95/5 пропорции вяжущее/активатор наблюдается растрескивание образцов при их выдержке в камере нормального твердения, что оказывает негативное влияние на прочность (рисунок 1).

Активация исходного материала гидроксидом калия также обеспечивает рост прочностных характеристик образцов вяжущего (рисунок 2). При применении в качестве активатора гидроксида калия результаты несколько ниже, чем при использовании гидроксида натрия. Следует отметить, что и в данном случае прослеживается тенденция к спаду прочностных характеристик при достижении определенного количества активатора. Установлено, что при отношении 97/3 вяжущее/активатор наблюдается пиковый прирост прочности в сравнении с неактивированным отходом сталелитейного производства на 106 % и 326 % для времени твердения в 28 суток и 56 суток соответственно. В составах 96/4 и 95/5 вяжущее/активатор происходит понижение прочностных характеристик в сравнении с пиковым значением.

Модификация отхода сталелитейного производства растворами серноокислого калия и натрия не способствует приросту а, в некоторых случаях, наблюдается снижение прочностных характеристик геополимерного вяжущего (рисунки 3 и 4). Полученные результаты могут быть связаны с низкой реакционной способностью данных активаторов и образованием пористых структур в процессе твердения [15, 20].

Процесс повышения прочностных характеристик при активации гидроксидом натрия обусловлен созданием в агрессивных условиях высокощелочного синтеза гелеобразных

продуктов N-A-S-H, N-S-H, K-A-S-H [10] с вяжущими характеристиками трехмерного каркаса. Геополимеризация включает следующие многоэтапные стадии [15]:

- растворение алюмосиликатного минерала под воздействием гидроксильных ионов (ОН⁻), присутствующих в высококонцентрированной щелочной среде;
- диффузия (или миграция) растворенных комплексов Al и Si;
- конденсация (или поликонденсация) с образованием геля;
- кристаллизация.

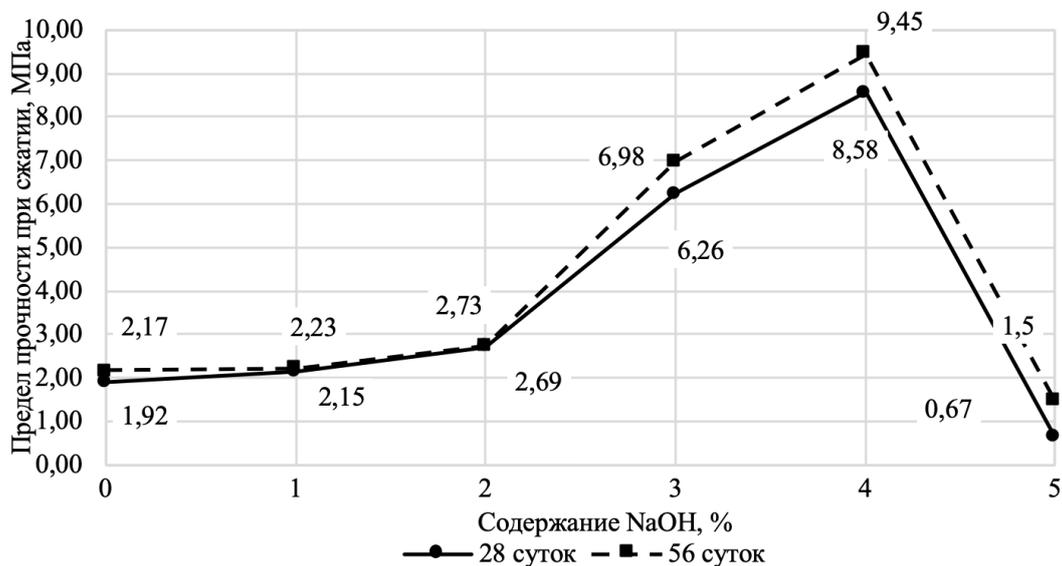


Рис. 1. Результаты исследований влияния гидроксида натрия на предел прочности при сжатии геополимерных вяжущих (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Results of the study of the effect of sodium hydroxide on the compressive strength of geopolymer binders (illustration by the authors)

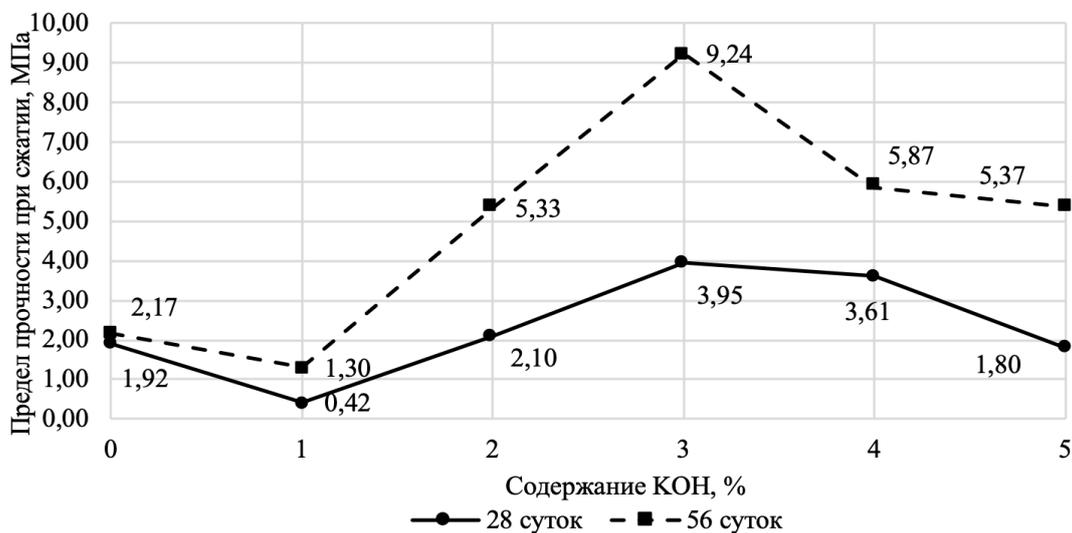


Рис. 2. Результаты исследований влияния гидроксида калия на предел прочности при сжатии геополимерных вяжущих (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Results of the study of the effect of potassium hydroxide on the compressive strength of geopolymer binders (illustration by the authors)

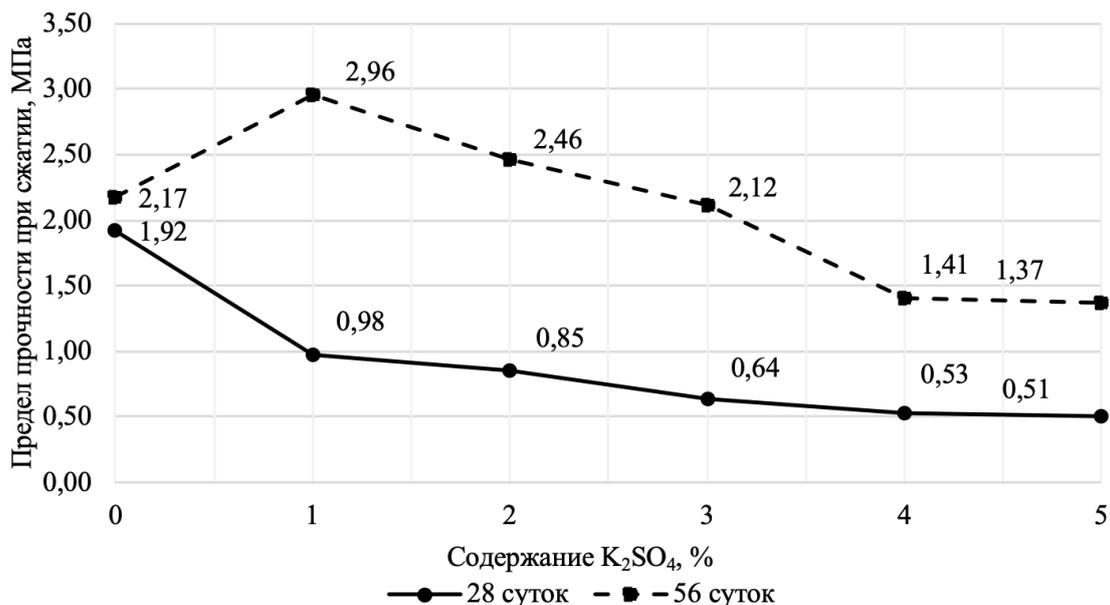


Рис. 3. Результаты исследований влияния калия сернокислого на предел прочности при сжатии геополимерных вяжущих (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Results of the study of the effect of potassium sulfate on the compressive strength of geopolymer binders (illustration by the authors)

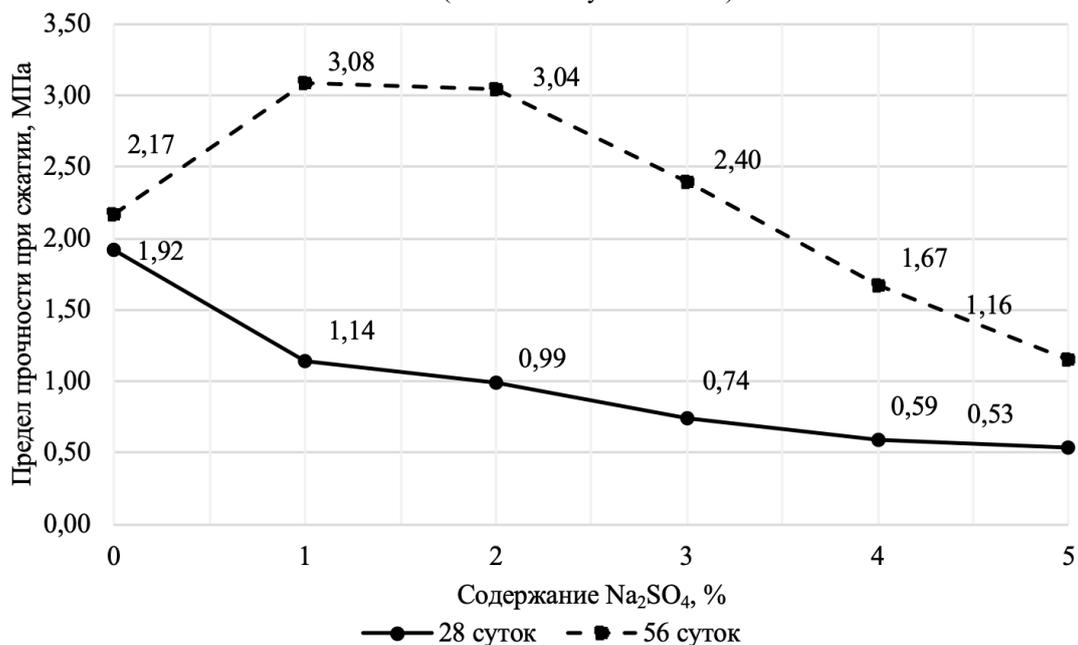


Рис. 4. Результаты исследований влияния натрия сернокислого на предел прочности при сжатии геополимерных вяжущих (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Results of the study of the effect of sodium sulfate on the compressive strength of geopolymer binders (illustration by the authors)

С увеличением времени твердения геополимерных вяжущих прочностные показатели повышаются (рисунки 1-4). Данное наблюдение можно объяснить тем, что с увеличением времени отверждения повышается процесс активности выщелачивания и количества образованных поровых структур, что, в свою очередь, увеличивает количество цементирующего продукта [23, 24].

Совместный эффект перечисленных химических процессов при активации отходов сталелитейного производства гидроксидом натрия и калия способствует повышению прочностных характеристик геополимерных вяжущих, что коррелирует с результатами работ других исследований [8, 12-24]. Полученные результаты являются предпосылкой

для дальнейшего исследования геополимерных вяжущих, в том числе при стабилизации и укреплении грунтов в дорожном строительстве.

4. Заключение

- Установлено, что активация отхода сталелитейного производства гидроксидом калия и натрия способствует приросту прочности, а также снижению водопотребности смеси с 0,25 до 0,1, что обусловлено созданием в агрессивных условиях высокощелочного синтеза гелеобразных продуктов N-A-S-H, N-S-H, K-A-S-H с вяжущими характеристиками трехмерного каркаса. Модификация отхода сталелитейного производства растворами сернокислого калия и натрия не способствует приросту прочности геополимерного вяжущего, а также повышает водопотребность смеси с 0,25 до 0,30, что может быть связано с низкой реакционной активностью данных активаторов и образованием пористых структур в процессе твердения.

- Определено оптимальное содержание калиевых и натриевых щелочей для активации отхода сталелитейного производства в составе геополимерного вяжущего. Выявлено, что активация отхода сталелитейного производства гидроксидом натрия оказывает максимальный прирост прочности в 3,5 раза при оптимальном отношении 96/4 вяжущее/активатор.

- Установлено, что с увеличением времени твердения разработанных геополимерных вяжущих прочностные показатели повышаются, что обусловлено повышением процессов активности выщелачивания, объема образованных поровых структур и в свою очередь, количества цементирующего продукта.

- Исследование щелочной модификации отходов сталелитейного производства выявило потенциал по разработке геополимерных вяжущих, использование которых может способствовать повышению эффективности технологий стабилизации и укрепления грунтов в дорожном строительстве.

Список литературы/References

1. Каменчуков А.В., Кормилицына Л.В., Лопашук В.В., Цупикова Л.С. Влияние сверхнормативной нагрузки на износ и разрушение дорожной одежды // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. №4 (106). С. 57-63. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.009.
Kamenchukov A.V., Kormilitsyna L.V., Lopashuk V.V., Tsupikova L.S. The influence of excess load on the abrasion and destruction of road structural layers // International Scientific Research Journal. 2021. No. 4 (106). P. 57-63. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.009.
2. Сенибабнов С.А., Андрианов К.А., Зубков А.Ф. Анализ нормативной документации по расчёту прочностных характеристик дорожных одежд нежесткого типа по допускаемому упругому прогибу // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. №1 (53). С. 28-43. DOI: 10.25987/VSTU.2019.53.1.003.
Senibabnov S.A., Andrianov K.A., Zubkov A.F. Analysis of regulatory documentation on the calculation of strength characteristics of non-rigid road structural layers according to the permissible elastic deflection // Scientific Journal of Construction and Architecture. 2019. No. 1 (53). P. 28-43. DOI: 10.25987/VSTU.2019.53.1.003.
3. Алесандров А.С. Анализ методов расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу в грунте // Вестник сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. №5 (81). С. 576-613. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-5-576-613.
Alexandrov A.S. Analysis of methods for calculating road structures for shear resistance in the ground // Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University. 2021. No. 5 (81). P. 576-613. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-5-576-613.
4. Smirnov D., Stepanov S., Garipov R., Garayev T., Sungatullin T. Influence of the porosity structure of road concrete on its durability // E3S Web of Conferences. 2021. 274. P. 04009. DOI: 10.1051/e3sconf/202127404009.

5. Fomin A., Khomyakov A. Asphalt concrete based on bituminous polysulfide binder, designed according to the volumetric method // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. 105. P. 10512. DOI: 10.4123/CUBS.105.12.
6. Mukhametrakhimov R.Kh., Lukmanova L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Magazine of Civil Engineering. 2021. 102(2). No. 10206. DOI: 10.34910/MCE.102.6.
7. Vdovin E.A., Bulanov P.E., Mavliev L.F. Physical and mechanical characteristics of soil stabilized with quicklime for road bed // Construction of unique buildings and structures. 2022. No. 7 (105). P. 10503. DOI: 10.4123/CUBS.105.3.
8. Lahiba I., Sardar K., Shazim A., Muhammad K. K., Muhammad F. J. A review of recent developments and advances in eco-friendly geopolymers concrete // Applied sciences. 2020. No. 10 (21). DOI: 10.3390/app10217838.
9. Медведева Г.А., Юсупова А.А., Сираева Э.Р., Макеева Д.А. Перспективные технологии утилизации отходов теплоэнергетики при изготовлении теплоизоляционных материалов // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2024. № 3 (7). С. 38-46.
Medvedeva G.A., Yusupova A.A., Siraeva E.R., Makeeva D.A. Promising technologies for waste disposal of thermal energy in the manufacture of thermal insulation materials // Highways and transport infrastructure. 2024. No. 3 (7). P. 38-46.
10. Сабирова З.Р., Трифонов А.А., Николаева Р.В. Исследование влияния свойств щебней на истираемость щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2024. № 2 (6). С. 14-20.
Sabirova Z.R., Trifonov A.A., Nikolaeva R.V. Investigation of the effect of crushed stone properties on the abrasion of crushed stone-mastic asphalt concrete mixture // Roads and transport infrastructure. 2024. No. 2 (6). P. 14-20.
11. Хафизов Э.Р., Бадрутдинов И.И. Усиление конструкции дорожной одежды асфальтобетонами, спроектированными по объемно- функциональному методу и методу Маршалла // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2024. № 2 (6). С. 93-102.
Hafizov E.R., Badrutdinov I.I. Reinforcement of the pavement structure with asphalt concrete, designed according to the volumetric-functional method and the Marshall method // Highways and transport infrastructure. 2024. No. 2 (6). P. 93-102.
12. Jwaida Z., Dulaimi A., Mashaan N., Othuman Mydin M.A. Geopolymers: the green alternative to traditional materials for engineering applications // Infrastructures. 2023. Vol. 8. No. 6. P. 98. DOI: 10.3390/infrastructures8060098.
13. Kriven WM., Leonelli C., Provis JL., Voccaccini AR., Attwell C., Ducman VS., et al. Why geopolymers and alkali-activated materials are key components of a sustainable world: A perspective contribution // Journal of the American ceramic society. 2024. No. 8 (107). DOI: 10.1111/jace.19828.
14. Jeremiah J.J., Abbey S.J., Booth C.A., Kashyap A. Geopolymers as alternative sustainable binders for stabilisation of clays - a review // Geotechnics. 2021. No. 1. P. 439-459. DOI:10.3390/geotechnics1020021.
15. Bryan Y., Kwong S., Ignatius R. A review on geopolymerisation in soil stabilization // IOP Conference series: materials science and engineering. 2019. Vol. 1. No. 8. P. 495. DOI: 10.1088/1757-899X/495/1/012070.
16. Шестаков Н.И., Астафьева В.А., Лебедев В.В., Воликов Ю.М. От металлургического шлака к устойчивому дорожному строительству: оценка возможностей и технологий // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2023. №4. С. 74-83. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-44-4-74-83.
Shestakov N.I., Astafieva V.A., Lebedev V.V., Volikov Yu. M. From metallurgical slag to sustainable road construction: the assessment of capabilities and technologies // Biosphere compatibility: man, region, technology. 2023. No. 4. P. 74-83. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-44-4-74-83.
17. Шишкина А. А. Металлургическая промышленность и ее негативное влияние на экологию // Инженерные технологии: традиции, инновации, векторы развития. 2022. С. 107-108.

- Shishkina A. A. Metallurgical industry and its negative impact on the environment // Engineering technologies: traditions, innovations, development vectors. 2022. P. 107-108.
18. Hayder H. A., Mohamed A. S., Megan L. W. Review of Fly-Ash-Based Geopolymers for Soil Stabilisation with Special Reference to Clay // Geosciences. 2020. No. 249. P 1-16. DOI:10.3390/geosciences10070249.
19. Abdullah H.H., Shahin M.A. Geomechanical behaviour of clay stabilised with fly-ash-based geopolymer for deep mixing // Geosciences. 2022. No. 12. P. 207. DOI: 10.3390/geosciences12050207.
20. Wu D., Zhang Z., Chen K., Xia L. Experimental investigation and mechanism of fly ash/slag-based geopolymer-stabilized soft soil // Applied sciences. 2022. Vol. 12. No. 15. P. 7348. DOI: 10.3390/app12157438.
21. Li Z., Zhang J., Wang M. Structure, reactivity and mechanical properties of sustainable geopolymer material: a reactive molecular dynamics study // Frontiers in Materials. 2020. No. 7:69. DOI: 10.3389/fmats.2020.00069.
22. Kamarudin H., Khairunnisa Z., Heah C., Mohd M., Liew Y., Siti F. Effect of Alkali Concentration on Fly Ash Geopolymers // IOP Conference series: materials science and engineering. 2018. No. 343 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/343/1/012013.
23. Debanath O. Ch., Rahman Md. A., Farook S.M., Islam M.R. Application of ecofriendly geopolymer binder to enhance the strength and swelling properties of expansive soils // Advances in civil engineering. 2024. Vol. 2024. DOI: 10.1155/2024/9910728.
24. Hamid Abed M., Sabbar Abbas I., Hamed M., Canakci H. Rheological, fresh, and mechanical properties of mechanochemically activated geopolymer grout: A comparative study with conventionally activated geopolymer grout // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126338.

Информация об авторах

Вдовин Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: vdovin@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-0649-4342

Строганов Виктор Фёдорович, доктор химических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: svf08@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9680-6698

Буланов Павел Ефимович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: pavel.bulanov1991@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0149-8854

Хусаенов Булат Каримович, ведущий инженер, ООО «Спецдорпроект», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: husaenov1711@mail.ru, ORCID: 0009-0005-3992-8505

Загидуллин Эмиль Ильфарович, инженер производственно-технического отдела, ООО «СТРОЙДОРТЕХНОЛОГИЯ», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: emil.ilfarovich@mail.ru, ORCID: 0009-0003-1245-0789

Information about the authors

Evgeniy A. Vdovin, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: vdovin@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-0649-4342

Victor F. Stroganov, doctor of chemical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: svf08@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9680-6698

Pavel E. Bulanov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: pavel.bulanov1991@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0149-8854

Bulat K. Khusaenov, lead engineer, LLC “Spetsdorproekt”, Kazan, Russian Federation
E-mail: husaenov1711@mail.ru, ORCID: 0009-0005-3992-8505

Emil I. Zagidullin, production and technical department engineer, LLC
“STROIDORTEKHNLOGIYA”, Kazan, Russian Federation
E-mail: emil.ilfarovich@mail.ru, ORCID: 0009-0003-1245-0789