

УДК 624.138 625.81 625.814.24

**Вдовин Евгений Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: [vdovin@kgasu.ru](mailto:vdovin@kgasu.ru)

**Строганов Виктор Федорович**

доктор химических наук, профессор

E-mail: [svf08@mail.ru](mailto:svf08@mail.ru)

**Мавлиев Ленар Фидаесович**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: [lenarmavliev@yandex.ru](mailto:lenarmavliev@yandex.ru)

**Коновалов Никита Витальевич**

аспирант, ассистент

E-mail: [for.nikita.k@gmail.com](mailto:for.nikita.k@gmail.com)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

**Кузнецов Андрей Владимирович**

мастер участка

**ОАО «Алексеевскдорстрой»**

Адрес организации: 422900, Россия, пгт. Алексеевское, ул. Чистопольская, д. 3

### **Анализ возможностей модификации и выбор рациональных методов и технологий укрепления грунтов активированными наполнителями для дорожных одежд**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Целью работы является анализ результатов исследований в области модификации укрепленных грунтов с применением активированных наполнителей. На основе проведенного анализа сделаны выводы о целесообразности и направлениях дальнейших исследований в данной области с целью улучшения физико-механических и эксплуатационных показателей материалов дорожных одежд.

*Результаты.* Выявлены основные способы модификации укрепленных грунтов. Рассмотрены различные помольные устройства для активации минеральных наполнителей. Представлены некоторые зависимости способов активации наполнителей на свойства укрепленных грунтов, полученные различными исследователями. Рассмотрена зависимость активности минерального наполнителя от времени и вида помольного устройства.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в теоретическом подтверждении возможности модификации укрепленных грунтов для дорожных одежд активированными наполнителями. Поставлены задачи для дальнейшего исследования модификации укрепленных грунтов активированными наполнителями различного состава, способов активации и технологии производства.

**Ключевые слова:** укрепленный грунт, активированный минеральный наполнитель, модификация, дорожная одежда, физико-механические и эксплуатационные свойства.

#### **Введение**

Развитие транспортной инфраструктуры страны неразрывно связано с экономическим ростом и благополучием населения. На данный момент в Российской Федерации более 20 % автомобильных дорог без твердого покрытия. Приоритетной задачей федеральных программ развития транспортной системы является увеличение протяженности дорог с усовершенствованными или переходными типами конструкций дорожных одежд. Дорожное строительство наиболее успешно может развиваться в условиях повышения качества, снижения стоимости и расширения номенклатуры дорожно-строительных материалов. Обеспечение необходимой степени надежности и долговечности, как конструктивных составляющих автомобильной дороги – земляного полотна, дорожной одежды, искусственных сооружений, так и дороги в целом – является важной задачей дорожного

строительства. Благодаря ориентации на инновационный путь развития дорожной сети России, Федеральное дорожное агентство реализует комплекс мер, направленный на увеличение межремонтного срока службы федеральных дорог до 12 лет по ремонту и до 24 лет – по капитальному ремонту. В связи с этим целенаправленно развиваются технологии, позволяющие добиться повышения качества строительных работ, за счет разработки и применения дорожно-строительных материалов с усовершенствованными физико-механическими и эксплуатационными качествами, что обуславливает возможности снижения затрат на ремонтные работы и повышение межремонтных сроков службы автомобильных дорог. Поскольку на территории Республики Татарстан практически отсутствуют прочные каменные материалы, которые в чистом виде возможно применять в конструкциях дорожных одежд, то наиболее перспективным развитием дорожно-строительной отрасли региона, с точки зрения максимального использования местных материалов и снижения материалоемкости строительства, является применение местных укрепленных и модифицированных материалов, а в частности – грунтов.

### Укрепленные грунты в конструкциях дорожных одежд

Укрепленные материалы и грунты могут применяться в слоях основания при капитальных и облегченных типах дорожных одежд, а так же в покрытиях со слоем износа при переходных типах конструкций дорожных одежд. Длительный опыт мониторинга и эксплуатации дорог, с основаниями, выполненными из укрепленных грунтов, доказывает, что такого рода материалы имеют высокие эксплуатационные и технико-экономические качества. Основным условием возможности применения местных укрепленных материалов и композиций является их соответствие предъявляемым требованиям. Материалы, применяемые в конструктивных слоях покрытия автомобильной дороги должны иметь высокие показатели прочности, истираемости, морозостойкости, а в конструктивных слоях основания дорожной одежды показатели прочности могут быть ниже, одним из основных критериев применимости является морозостойкость материала. Положение, сформулированное М.М. Филатовым и развитое в работах В.М. Безрука, заключается в том, что при разработке методов укрепления грунтов следует учитывать свойства и особенности тонкодисперсной части грунта, химический и минералогический составы, а так же генетические признаки грунта, что представляет собой научную основу укрепления грунтов. Это говорит о необходимости учитывать весь комплекс процессов, происходящих при укреплении грунтов.

По мнению авторов [1], при укреплении грунтов можно выделить следующие основные процессы, происходящие в материале (рис. 1).

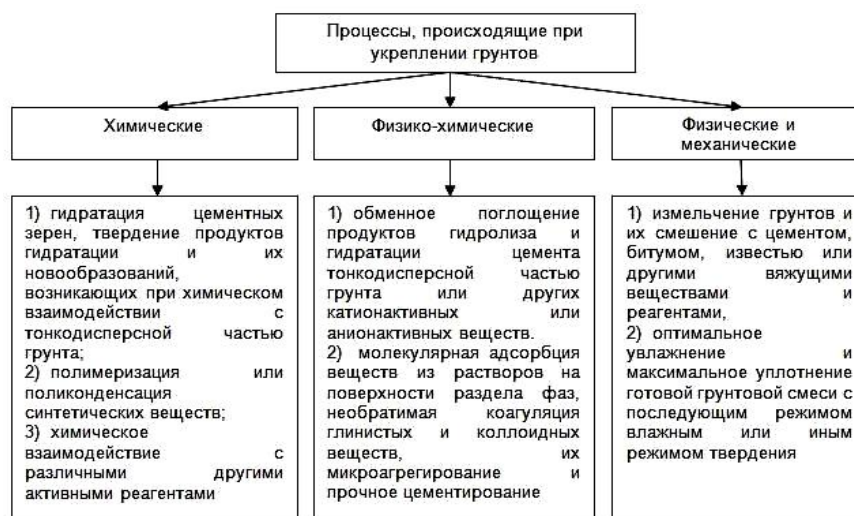


Рис. 1. Схематическое представление о процессах, происходящих при укреплении грунтов вяжущими и химическими реагентами  
 ([1] Е.А. Вдовин, В.Ф. Строганов, Л.Ф. Мавлиев)

Существует ряд работ с предложениями по модификации грунтов. Например, в работах Department for International Development (DFID) и Department of Public Works and Highways (DPWH), основанных на трудах S.W. Colwill и Raul C. Asis [2] отмечено, что наиболее рациональным для укрепления материалов является применение цемента, а различные модификационные добавки и отходы промышленных предприятий необходимо использовать для снижения расхода вяжущего и улучшения свойств минерального материала.

Считается, что повышение качества укрепленных грунтов является актуальной проблемой, её решение исследователи видят в широком применении модификации функциональными добавками, в том числе активированными наполнителями, влияющими на структуру и свойства материалов.

### **Модификация материалов**

В строительном материаловедении под модификацией понимают именно эту взаимосвязь изменений физико-химической структуры и свойств материалов, что нашло отражение в работах Баженова Ю.М., Ратинова В.Б., Бутта Ю.М., Соломатова В.И. и ряда других исследователей [3]. Основные направления исследования могут быть представлены в следующих типах модифицирования за счет:

- создания искусственных центров кристаллизации при прямом введении в смесь примесных компонентов – «инокуляция»;
- введения поверхностно-активных веществ, замедляющих рост зёрен и способствующих образованию стабильных мелкокристаллических зародышей – «ингибция»;
- применения ряда технологических операций, в частности тепловой обработки, интенсивного перемешивания, вызывающих образование достаточного количества зародышей (физико-механические методы).

Именно с позиций этих концепций авторы [4, 5] предлагают и считают, что грунты, укрепленные цементом, необходимо модифицировать гидрофобизирующими и пластифицирующими добавками на основе эфира поликарбоксилата и октилтриэтоксисилана, а так же комплексными добавками на основе кремнийорганических соединений и электролитов, что повышает механическую прочность укрепленных грунтов и их морозостойкость.

Одним из перспективных и довольно распространенных способов модификации различных композиционных материалов является активация входящих в состав композиции наполнителей. Различают несколько видов активации: механическая – при измельчении материала в различных помольных устройствах; механо-химическая активация – измельчение материала совместно с различными химическими добавками; термическая активация; электро-магнитная активация; ультразвуковая активация; активация ионизирующим излучением; химическая – травление кислотными или щелочными растворами для создания микрорельефа частиц.

На наш взгляд наиболее технологичным способом модификации является механическая или механохимическая активация наполнителей. Теоретические основы механохимических процессов, созданные в начале XX в. известным физико-химиком В.Оствальдом и фундаментальные исследования П.А. Ребиндера, способствовали зарождению нового направления науки – механохимии, в которой рассматривается использование или превращение химических реакций вызываемых или ускоряемых механической активацией.

Известно, что минеральные порошки, представляющие собой полидисперсные материалы, способны служить структурирующими добавками и компонентами асфальтобетонов, цементобетонов и укрепленных грунтов. По мнению Рыбьева И.А. [6], доминирующее значение адсорбента с высокоразвитой и энергетически активной поверхностью, в общей минеральной смеси щебня, песка и минерального порошка имеет порошкообразный компонент. В этой связи все больший интерес исследователей вызывает применение активационных технологий для модификации поверхности частиц минеральных компонентов асфальтобетонов и других смесей для дорожных одежд.

Одними из первых основные положения механохимии в дорожном строительстве успешно применены Рыбьевым И.А., Гезенцевым Л.Б., Хинтом И.А. и др. [6].

В качестве помольных устройств известно применение различных приборов: шаровая, трубчато-шаровая, струйно-вихревая, пружинная, планетарная мельницы, а также дезинтеграторные установки, центробежно-помольно-смесительные агрегаты и др. Основное отличие помольных устройств – в способе воздействия на частицу материала: истирание, ударное воздействие, раздавливание. В зависимости от вида воздействия на активируемый материал формируется определенный тип поверхности частиц [7]. В случае шаровых и вибрационных мельниц частицы, как правило, имеют более окатанную поверхность, что снижает их реакционную способность и технологичность, в помольных устройствах с более высоконапряженным состоянием, таких как: планетарная мельница или дезинтеграторная установка, реализуется ударное воздействие на частицы, в результате чего форма поверхности активированного материала более острогранная (рис. 2).

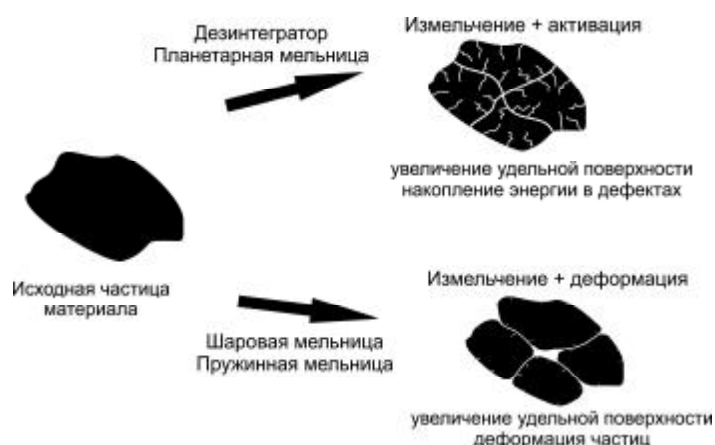


Рис. 2. Схематичное изображение характера воздействия на исходную частицу материала и получаемый эффект в различных помольных устройствах (иллюстрация авторов)

Одной из важных задач механохимии является изучение причин, которые приводят к изменению активности твердых веществ в процессе механохимической обработки.

Диспергирование приводит к изменению некоторых параметров, которые влияют на активность обрабатываемого материала:

- изменение гранулометрического состава;
- изменение формы и рельефа поверхности частиц;
- повышение удельной поверхности;
- увеличение количества активных поверхностных центров;
- аморфизация поверхности.

Для оценки активности обработанного механоактивацией материала, рядом ученых КГАСУ (научный журнал «Известия КГАСУ» № 2 (24), стр. 273-280), была исследована удельная поверхность методом Козени-Кармана и седиментационного анализа (рис. 3), на основе данных показателей авторы сделали вывод о том, что наиболее эффективный помол осуществляется в дезинтеграторной установке, так как преобладает массовая доля частиц с меньшим диаметром, обеспечивая эффективное химическое взаимодействие компонентов активированного наполнителя.

Однако, как показывают исследования изменений концентрации активных адсорбционных центров на поверхности порошков, тенденция роста количества активных центров, наблюдается до определенной величины удельной поверхности, после чего процесс замедляется. В виду того, что помол материала достаточно энергоемок, необходимо выявить оптимальные значения удельной поверхности, выше которых дальнейший помол нецелесообразен, так как рост активности незначителен [8]. На рис. 4 представлена зависимость концентрации активных центров от удельной поверхности отходов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов (ММС), измельченных в различных мельницах, полученная в ходе исследования проведенного Траутвайн А.И. [8]. Проанализировав зависимость можно сделать вывод, что наиболее эффективной является

шаровая планетарная мельница, а так же струйная противоточная мельница. Опираясь на данные графика можно судить о том, что оптимальное количество активных центров достигается уже на 500-550 м<sup>2</sup>/кг удельной поверхности при использовании шаровой планетарной мельницы и струйной поточной мельницы, а при использовании шаровой и вибромельницы максимальная концентрация активных центров достигается при значении удельной поверхности порядка 300-400 м<sup>2</sup>/кг, это говорит о том, что показатель площади удельной поверхности не всегда свидетельствует об активности дисперсного материала.

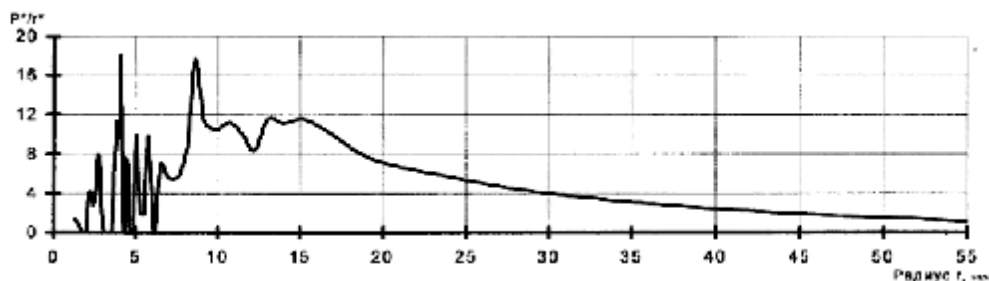


Рис. 3. Дифференциальная зависимость массы седиментационного осадка от радиуса измельчения в дезинтеграторной установке (Строганов В.Ф., Рязанов Ш.А.)

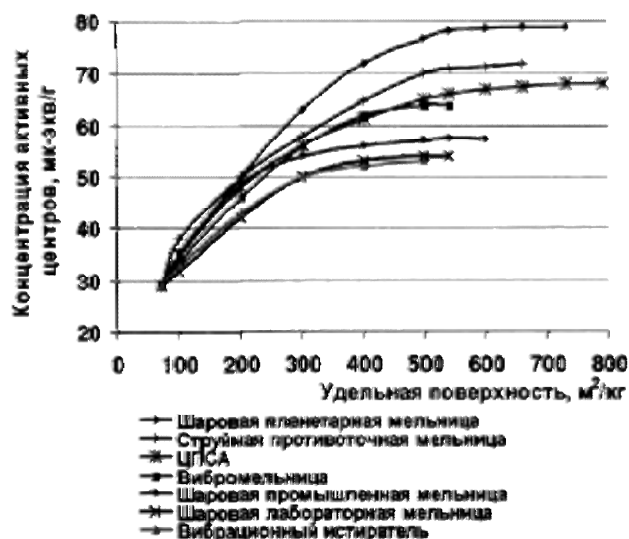


Рис. 4. Зависимость концентрации активных центров от удельной поверхности ММС, измельченных в различных мельницах (Траутвайн А.И.)

Следует также учитывать склонность молотых порошков к быстрой потере активации на воздухе в результате высокой адсорбционной способности и взаимной компенсации образованных зарядов. Время существования в воздушной среде радикалов, возникающих при механохимической обработке, составляет всего  $10^{-3}$ - $10^{-6}$  с. Адсорбция свежемолотыми порошками паров углекислого газа и влаги из воздуха и насыщение некомпенсированных молекулярных сил приводит не только к «старению» поверхности наполнителей, но и служит дополнительным препятствием образованию надежных адгезионных контактов. В связи с этим, механохимическая активация наполнителей эффективна при создании на их зернах первичного контактного слоя структурированного связующего непосредственно в процессе измельчения [3]. В работе Прокопца В.С. [9] исследовано влияние времени выдерживания механоактивированного компонента на прочность цементогрунта (рис. 5). Установлено, что наиболее оптимальным видом грунта для механической активации является супесь (активация выполнялась в смеси с грунтом).

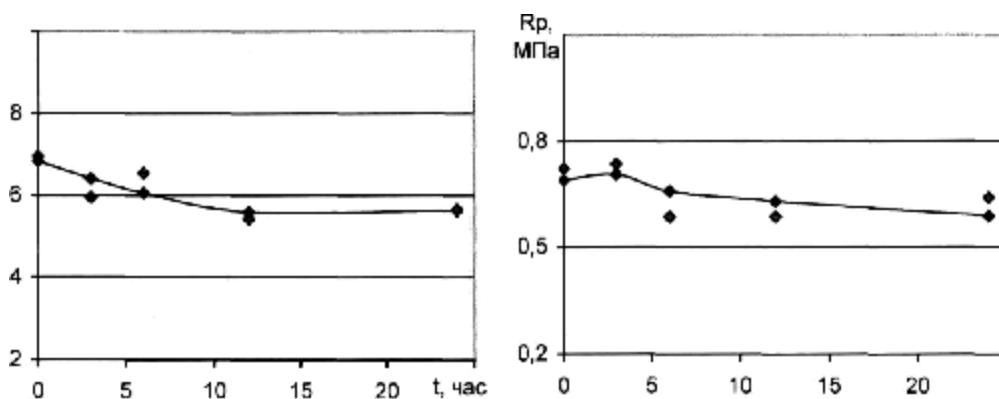
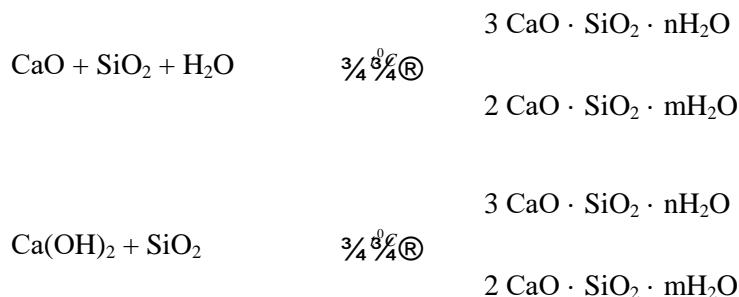


Рис. 5. Зависимость показателей прочности и хрупкости от времени выдерживания молотого компонента [9]

Из графика видно, что спустя 5-10 часов падение прочности стабилизируется, что согласуется с исследованиями [8], по результатам которых падение активности наблюдается в период 0,5-3 часа, а далее процесс практически стабилизируется. Скорость снижения активности зависит от влажности среды, в которой хранится порошок. Автор исследования отмечает, что поставлять активированный наполнитель возможно в полиэтиленовой упаковке, так как этого достаточно для сохранности уровня необходимой активности материала. Это утверждение нельзя признать однозначным и убедительным, учитывая свойства полимерных пленок.

Дополнительное изучение необходимо и для выяснения вопроса: применение каких материалов в качестве механоактивируемых наполнителей наиболее целесообразно. Например, в исследовании, опубликованном в научном журнале Известия КГАСУ № 2 (24) (стр. 273-280), авторы используют в качестве наполнителей песок и известь, активируя их при совместном помоле в присутствии воды, основываясь на известной гипотезе взаимодействия, между SiO<sub>2</sub> и CaO протекающими в результате химических реакций:



С образованием, модифицированной плёнкой из извести, поверхности кварцевого песка, что способствует увеличению межатомных и межмолекулярных взаимодействий компонентов композиционного материала.

Известно, что методы активации наполнителей механическим воздействием широко применяются в цементах низкой водопотребности (ЦНВ), так как при совместной физико-химической механоактивации наиболее полно и эффективно реализуются возможности как самого портландцемента, так и минеральных добавок. В работе [10] авторы осуществляли совместный помол цемента, суперпластификатора и известняка. Установлено, что помимо существенного улучшения строительно-технических свойств бетонов на ЦНВ, снижается показатель клинкероёмкости, который является критерием экологической и энергетической эффективности общестроительных цементов [10].

На наш взгляд, в качестве материалов для активации желательно и целесообразно применять местные минеральные материалы, если это технически выполнимо и теоретически обосновано в используемых активационных механизмах.

### Заключение

Применение укрепленных материалов и грунтов в дорожном строительстве широко зарекомендовало себя, как ресурсосберегающий и современный метод строительства. Проанализировав области применения активированных наполнителей можно сделать однозначный вывод о целесообразности использования данного метода в модифицировании укрепленных грунтов. В качестве способа активации предпочтительнее использовать механико-химическую активацию, так как существует обоснованная необходимость введения в смесь различных поверхностно-активных веществ для направленного улучшения необходимых свойств цементогрунта, исходя из предъявленных требований. В дальнейших исследованиях, на наш взгляд, интерес представляет решение следующих вопросов:

- исследование оптимальных составов композиций для активации, исходя из применимости в качестве модификатора в укрепленных грунтах различного генезиса;
- определение оптимальных способов и технологий активации и выбор оборудования для каждого вида применяемых материалов;
- исследование процессов и условий снижения активности в процессе хранения активированных материалов;
- исследование влияния активированных наполнителей на физико-механические свойства укрепленных грунтов;
- разработка технологических схем введения активированных наполнителей при устройстве слоев дорожных одежд с применением модифицированных укрепленных грунтов.

Решение поставленных вопросов необходимо не только при выполнении данной технической задачи, но и для выявления ряда теоретических представлений по проблеме модификации активированными наполнителями в строительном материаловедении.

### Список библиографических ссылок

1. Вдовин Е. А., Мавлиев Л. Ф., Строганов В. Ф. Пути повышения эффективности укрепления грунтов для строительства дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2013. № 1 (29). С. 52–58.
2. Roger L. B., Brockenbrough P. E. Highway Engineering Handbook. N-Y. : McGraw-Hill, 2009. 885 p.
3. Дворкин Л. И., Соломатов В. И., Выровой В. Н., Чудновский С. М. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. К. : Будивэльнык, 1991. 136 с.
4. Mavliev L., Bulanov P., Vdovin E., Zaharov V., Gimazov A. Road Soil Cement with Complex Additives Based on Organosilicon Compounds and Electrolytes // ZKG: zement-kalk-gips international. 2016. № 9 (69). P. 49–54.
5. Beeghly J., Schrock M. Dredge material stabilization using the pozzolanic or sulfo-pozzolanic reaction of lime by-products to make an engineered structural fill // International Journal of Soil, Sediment and Water. 2010. № 3 (11). С. 1–21.
6. Рыбьев И. А. Строительное материаловедение. М. : Высш. школа, 2002. 701 с.
7. Balaz P., Achimovicova M., Billik P. Hallmarks of mechanochemistry: from nanoparticles to technology // Chem. Soc. Rev. 2013. № 42. С. 7571–7637.
8. Траутвайн А. И. Образование активных центров при помолле минеральных материалов в различных мельницах и их влияние на взаимодействие в контактной зоне : сб. ст. Международной научно-практической конференции «Инновационные материалы и технологии» (XX научные чтения) / Белгород, 2011. С. 139–143.
9. Прокопец В. С., Лесовик В. С. Производство и применение дорожно-строительных материалов на основе сырья, модифицированного механической активацией. Белгород : Белаудит, 2005. 264 с.
10. Хохряков О. В., Хозин В. Г., Харченко И. Я., Газданов Д. В. Цементы низкой водопотребности – путь эффективного использования клинкера и минеральных наполнителей в бетонах // Вестник МГСУ. 2017. Том 12. № 10 (109). С. 1145–1149.

**Vdovin Evgeny Anatolyevich**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [vdovin@kgasu.ru](mailto:vdovin@kgasu.ru)**Victor Fedorovich Stroganov**

doctor of chemical sciences, professor

E-mail: [svf08@mail.ru](mailto:svf08@mail.ru)**Mavliev Lenar Fidaesovich**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [lenarmavliev@yandex.ru](mailto:lenarmavliev@yandex.ru)**Konovalov Nikita Vitalyevich**

post-graduate student, assistant

E-mail: [for.nikita.k@gmail.com](mailto:for.nikita.k@gmail.com)**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Kuznetsov Andrey Vladimirovich**

road master

**OJSC «Alekseevskdorstroy»**

The organization address: 422900, Russia, Alekseevskoe, Chistopolskaya st., 3

**Analysis of the possibilities of modification and the choice  
of rational methods and technologies for strengthening the soil by activated fillers  
for road construction**

**Abstract**

*Problem statement.* The aim of the work is to analyze the results of research in the field of soil modification and strengthening using activated fillers. Based on the analysis, conclusions were drawn on the feasibility and directions for further research in this area in order to improve the physical, mechanical and performance indicators of road construction materials.

*Results.* The main methods of soil modification and strengthening are revealed. Various grinding devices for the activation of mineral fillers are considered. Some dependences of the methods of activation of fillers on the properties of modified soils obtained by various researchers are presented. The dependence of the activity of the mineral filler on the time and type of grinding device is considered.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry consists in the theoretical confirmation of the possibility of modifying fortified soil pavements with activated fillers. Tasks have been set for the further study of the modification of fortified soils with activated fillers of different composition, activation methods and production technology.

**Keywords:** reinforced soil, activated mineral filler, modification, road pavement, physical, mechanical and performance properties.

**References**

1. Vdovin E. A., Mavliev L. F., Stroganov V. F. How to improve the capacity of soils for construction of road pavements // Vestnik SibADI 2013. № 1 (29). P. 52–58.
2. Roger L. B., Brockenbrough P. E. Highway Engineering Handbook. N-Y. : McGraw-Hill, 2009. 885 p.
3. Dvorkin L. I., Solomatov V. I., Vyrovoy V. N., Chudnovsky S. M. Cement concrete with mineral fillers. K. : Budivelnyk, 1991. 136 p.
4. Mavliev L., Bulanov P., Vdovin E., Zaharov V., Gimazov A. Road Soil Cement with Complex Additives Based on Organosilicon Compounds and Electrolytes // ZKG: zement-kalk-gips international. 2016. № 9 (69). P. 49–54.



5. Beeghly J., Schrock M. Dredge material stabilization using the pozzolanic or sulfo-pozzolanic reaction of lime by-products to make an engineered structural fill // International Journal of Soil, Sediment and Water. 2010. № 3 (11). С. 1–21.
6. Rybyev I. A. Construction materials science. M. : Vysshaya shkola, 2002. 701 p.
7. Balaz P., Achimovicova M., Billik P. Hallmarks of mechanochemistry: from nanoparticles to technology // Chem. Soc. Rev. 2013. № 42. P. 7571–7637.
8. Trautvain A. I. Formation of active centers in the grinding of mineral materials in various mills and their influence on the interaction in the contact zone : dig. of art. International scientific-practical conference «Innovative materials and technology» (XX scientific readings) / Belgorod, 2011. P. 139–143.
9. Prokopets B. C., Lesovik V. S. Production and use of road-building materials based on raw materials modified by mechanical activation. Belgorod : Belaudit, 2005. 264 p.
10. Khokhryakov O. V., Khozin V. G., Kharchenko I. Ya., Gazdanov D. V. Low water demand cements – way of efficient use of clinker and mineral fillers in concretes. // Vestnik MGSU. 2017. Vol. 12. № 10 (109). P. 1145–1149.