УДК 691

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-6-96-104

© Т. А. Иванова, канд. техн. наук

© T. A. Ivanova, PhD in Sci. Tech.

© Л. Г. Колесникова, ст. преподаватель

© L. G. Kolesnikova, senior teacher

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: ivonna@lan.spbgasu.ru, lkolesnikova@lan.spbgasu.ru

E-mail: ivonna@lan.spbgasu.ru, lkolesnikova@lan.spbgasu.ru

© Т. М. Петрова, д-р техн. наук, профессор

© T. M. Petrova, Dr. Sci. Tech., Professor

(Петербургский государственный университет путей
связи им. Александра I,
Санкт-Петербург, Россия)

(St. Petersburg State University
of Railway Transport named after Alexander I,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: petrova@pgups.ru

E-mail: petrova@pgups.ru

ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЙ БЕТОН ДЛЯ ТРОТУАРОВ И ПЕШЕХОДНЫХ ДОРОЖЕК

ELECTRICALLY CONDUCTIVE CONCRETE FOR SIDEWALKS AND PEDESTRIAN PATHS

Рассмотрены и приведены характеристики электропроводящего бетона на основе портландцемента, токопроводящих наполнителей и добавок для пешеходных зон и тротуаров. Электропроводящие покрытия могут быть весьма полезными и эффективными для очистки пешеходных дорожек и тротуаров в городах от снега и наледи без использования химических реагентов и загрязняющих подсыпок. Проведен химический анализ ряда токопроводящих компонентов бетона с целью определения в них количественного содержания углерода. Изготовлены опытные образцы электропроводящего бетона с различным содержанием токопроводящего компонента и определены их физико-механические характеристики и электропроводность.

Ключевые слова: электропроводность бетона, физико-механические характеристики бетона, химический анализ токопроводящих компонентов, покрытия тротуаров, антиобледенение пешеходных дорожек.

The article considers the properties of electrically conductive concrete based on Portland cement, current-conducting fillers and additives intended to be used for pedestrian zones and sidewalks. Electrically conductive concrete overlay can be very useful and effective for cleaning pedestrian paths and sidewalks in the city from snow and ice, for in this case there is no need for chemicals and polluting fillings. There has been carried out a chemical analysis of a number of current-conductive components of concrete aimed at determining the quantitative carbon content. Experimental samples of electrically conductive concrete with variable content of the current-conductive component have been made and their electrical conductivity and physical and mechanical properties have been determined.

Keywords: electrical conductivity of concrete, physical and mechanical characteristics of concrete, chemical analysis of current-conductive components, pavement overlay, deicing of pedestrian paths.

Введение

Многие регионы России, в том числе Санкт-Петербург, находятся в неблагоприятных климатических условиях. По своему географиче-

скому местоположению Ленинградская область и Санкт-Петербург находятся в зоне избыточной влажности. Климат имеет черты морского и континентального, с умеренно мягкой зимой и уме-

ренно теплым летом. Снежный покров обычно формируется в начале декабря, а исчезает в последней декаде марта, т. е. держится обычно около 120–130 дней, при этом нередко происходит чередование его оттаивания с последующим обледенением.

В городах покрытия тротуаров и дорог испытывают воздействие снегопадов, перепадов температур, ветрового переноса. Уплотненные снежно-ледяные образования на поверхностях дорожек и тротуаров вызывают повышенную травмоопасность для населения. Основными методами борьбы с нарастающей на поверхности дорожек наледью являются подсыпка песка или очистка снежного покрова солью и химическими реагентами. Это приводит не только к загрязнению тротуаров и разрушению покрытий, но и к порче обуви, прилегающих газонов и ухудшению экологической обстановки в целом. Для решения этой проблемы в некоторых странах с близкими климатическими условиями укладывают «теплые» дороги: под покрытием укладывают трубы, через которые циркулирует горячая вода [1, 2].

Для улучшения экологической обстановки при решении проблем с образованием наледи будет весьма полезен в качестве покрытий новый материал на основе электропроводящего бетона, позволяющий увеличить эффективность очистки от наледи тротуаров и пешеходных дорожек в зимнее время и, следовательно, снизить травмоопасность для населения.

Электропроводящий бетон отличается по составу от обычного бетона наличием дисперсного токопроводящего компонента, обладающего необходимой электропроводностью, температурной стойкостью, способностью противостоять окислительным процессам при изготовлении бетона, его эксплуатации и нагреве. При этом такой компонент бетона не должен вступать в химическое взаимодействие с цементом, что может привести к нестабильности свойств самого бетона [3].

Электропроводящий бетон должен иметь способность равномерно генерировать тепло по всей нагреваемой поверхности. Сама идея получения электропроводящих бетонов не является новой, для производства в его состав вводят токопроводящие частицы наполнителя (например,

сажу, графит, наночастицы оксида железа, углеродные трубки, никелевый порошок и др.) [3, 4].

Токопроводящие компоненты делятся на две основные группы: металлы и углерод. Токопроводящие компоненты на основе углерода дешевле и более доступны, и при высокой его концентрации в материале создаются непрерывные проводящие цепи [4].

Обычный бетон при определенных температурно-влажностных условиях способен проводить электрический ток в некоторой степени, но это свойство нестабильно. При насыщении бетона водой происходит переход легкорастворимых компонентов цементного камня в жидкую фазу, и его удельное электрическое сопротивление оказывается низким. Высыхание бетона (испарение свободной влаги) сопровождается ростом удельного электрического сопротивления, электропроводность падает и практически исчезает.

При разработке эффективного электропроводящего бетона в качестве покрытия тротуаров и дорожек необходимо учитывать не только его повышенные токопроводящие свойства, но и физико-механические, а также его режим твердения. В процессе эксплуатации электропроводящий бетон не должен в значительной мере насыщаться водой, что может снизить эффективность прогрева и повлиять на длительность срока службы. Следовательно, электропроводящий бетон должен иметь как можно более низкую пористость, а для повышения плотности и удобоукладываемости в бетонную смесь можно вводить добавки суперпластификаторов или применять вяжущие низкой водопотребности [5].

На сегодняшний день отсутствуют нормативные документы по определению электрических свойств бетонов. Опытным путем было установлено, что при введении в смесь токопроводящих частиц в количестве свыше 30 % наблюдается заметная потеря прочности бетона. Зависимость прочности на сжатие и электросопротивления бетона от объемной концентрации углерода в композиционном вяжущем показывает, что с увеличением концентрации углеродной добавки уменьшается прочность бетона и увеличивается его электропроводность [6, 7].

Цель работы — выбор эффективного углеродосодержащего компонента и разработка

состава электропроводящего бетона для покрытия тротуаров и пешеходных дорожек.

Материалы и методы исследований

Исследован ряд углеродосодержащих материалов, которые могут входить в состав электропроводящих бетонов в качестве токопроводящих компонентов.

Шунгит — природный минерал, содержит углерод, кварц и силикатные слюды. Особенностью шунгита является то, что углерод в нем находится в промежуточном состоянии между аморфным углеродом и кристаллическим графитом. Шунгитовый углерод представляет собой окаменевшее вещество органических донных отложений высокого уровня карбонизации с содержанием фуллереноподобных регулярных структур [8]. Шунгиты различаются по составу минеральной основы (алюмосиликатной, кремнистой, карбонатной) и количеству шунгитового углерода. Шунгитовые породы с силикатной минеральной основой подразделяются на малоуглеродистые (до 5 % С), среднеуглеродистые (5–25 % С) и высокоуглеродистые (25–80 % С). Электропроводность шунгита зависит от содержания в нем как углерода, так и примесей соединений железа.

Графит — весьма распространенный в природе минерал, встречается в виде отдельных чешуек, пластинок и скоплений, разных по величине. Различают месторождения кристаллического графита, связанного с магматическими горными породами или кристаллическими сланцами, и скрытокристаллического графита, образовавшегося при метаморфизме углей. Содержание графита в кристаллических сланцах составляет 3–20 %, в магматических горных породах — 3–50 %, в углях — 60–85 %.

Графит кристаллический литейный ГЛ-1 (графит серебристый пылевидный), получаемый из графитовых руд (графит природный) или отходов металлургического и других производств (графит искусственный), применяют для покрытия формообразующих поверхностей форм и стержней при производстве литья из чугуна сложной конфигурации с поверхностью высокого качества, в качестве присыпки на оснастку при получении чугунных отливок [9].

Графит карандашный изготавливается из материала природного происхождения, осно-

ву которого составляет углерод. Имеет высокую электропроводность и устойчивость к температурным воздействиям, способен расслаиваться при трении (применяется для изготовления пишущих стержней графитовых карандашей). Широкое применение также получил в изготовлении графитовых паст, графитовых препаратов, материалов с высокой степенью очищения, смазок, применяемых при волочении проволок, при изготовлении электропроводящих покрытий кабелей.

Технический углерод — вид промышленных углеродных продуктов, используемый в основном при производстве резины как наполнитель, усиливающий ее полезные эксплуатационные свойства. В отличие от кокса и пека, состоит почти из одного углерода, по виду напоминает сажу.

Технический углерод Т 900 — малоактивный, получают термическим разложением природного газа, с низким показателем дисперсности и низким показателем структурности. Материал со средним размером частиц 90 нм образуется при неполном сгорании или термическом разложении углеводородов, содержащихся в природных или промышленных газах, а также в жидких продуктах нефтяного или каменноугольного происхождения.

Технический углерод П 234 — печной, активный, со средним размером частиц 20 нм, получают при термоокислительном разложении жидкого углеводородного сырья.

Методами исследования выбраны химический анализ углеродосодержащих компонентов, подбор и изготовление экспериментальных составов бетона, определение электропроводности и физико-механических характеристик бетона с углеродосодержащими компонентами.

Результаты исследований

На первом этапе был проведен химический анализ углеродосодержащих материалов с целью определения и сравнения содержания в них углерода и выявления наиболее подходящих токопроводящих наполнителей для дальнейшего использования в разработке состава электропроводящего бетона.

На рис. 1–5 представлены микрофотографии порошка шунгита, графита кристаллического литейного, графита карандашного и технического углерода Т 900 и П 324. В табл. 1–5 приведены результаты спектрального анализа элементов,

Рис. 1. Микрофотография порошка шунгита с указанием зон отбора проб для спектрального анализа

Рис. 2. Микрофотография графита кристаллического литейного (ГЛ-1) с указанием зон отбора проб для спектрального анализа

Таблица 1

Содержание углерода в образце шунгита по зонам отбора проб, весовые %

Зона отбора проб	Углерод
Спектр 1	67,04
Спектр 2	81,05
Спектр 3	5,78
Спектр 4	0
Спектр 5	89,65
Спектр 6	83,47
Спектр 7	30,19
Спектр 8	68,64
Спектр 9	62,27

входящих в состав образцов, пробы взяты в разных зонах образца минерала.

Когда содержание углерода в шунгите выше 50 %, у него изменена пористая структура, внешне он блестящий, как будто покрыт лаком. Исследования коллектива авторов работы [10] позволяют увидеть зависимость электропроводимости шунгита от содержания в нем углерода (98, 30 и 2,5 %), что соответствует предельным значениям электропроводности 10^{-2} , 10^{-3} и 10^{-11} (Ом · см)⁻¹. Полагаясь на эти данные, можно предложить использовать шунгит для создания композиционных материалов с электропроводностью ниже 10^{-2} (Ом · см)⁻¹.

Таблица 2

Содержание углерода в образце графита кристаллического литейного по зонам отбора проб, весовые %

Зона отбора проб	Углерод
Спектр 1	91,69
Спектр 2	89,58
Спектр 3	92,01
Спектр 4	90,65

Дальнейшие исследования проводились только с токопроводящими компонентами, у которых содержание углерода составляет 90 % и более, — П 234, Т 900, ГЛ-1.

На основании испытаний, проведенных в МАДИ [6], можно говорить о том, что чем выше содержание токопроводящего наполнителя, тем выше скорость нагрева материала. Но с учетом получения требуемых прочностных характеристик нужно использовать составы с содержанием токопроводящих наполнителей не более 11 %.

На втором этапе были разработаны лабораторные составы электропроводящего бетона класса В25 с количественной характеристикой удобоукладываемости П4. Токопроводящий наполнитель в количестве 10 % от массы цемента.

Рис. 3. Микрофотография графита карандашного с указанием зон отбора проб для спектрального анализа

Рис. 4. Микрофотография технического углерода Т 900 с указанием зон отбора проб для спектрального анализа

Таблица 3

Содержание углерода в образце графита карандашного по зонам отбора проб, весовые %

Зона отбора проб	Углерод
Спектр 1	86,11
Спектр 2	86,80
Спектр 3	86,93
Спектр 4	87,58

Полученный состав на 1 м³:

Вода, л	206,5
Цемент М500, кг	486
Щебень фракцией 5–10 мм, кг	1190
Песок, кг	448
Пластифицирующая добавка, л	4
Токопроводящий наполнитель, кг	48,6

Для проведения физико-механических испытаний и определения электропроводности изготавливали образцы в последовательности: сначала перемешивали песок и щебень, затем добавляли токопроводящий наполнитель (П 234, Т 900, ГЛ-1) с цементом, далее добавляли воду в расчетном количестве с введенным в нее суперпластификатором ST 4.3.1 (0,8 % от массы цемента).

Смесь получилась по внешнему виду достаточно однородная, графит равномерно распре-

Таблица 4

Содержание углерода в образце технического углерода Т 900 по зонам отбора проб, весовые %

Зона отбора проб	Углерод
Спектр 1	96,69
Спектр 2	98,83
Спектр 3	98,9
Спектр 4	98,58
Спектр 5	98,92
Спектр 6	98,64

делился в объеме. Подвижность бетонной смеси определена с помощью конуса Абрамса и составила (ОК 17–18 см) П4.

Для сравнения показателей электропроводности и выявления зависимости ее от процентного содержания токопроводящего наполнителя решено было изготовить образцы с содержанием 15 и 20 % от массы цемента.

Для испытаний на электропроводность [11, 12] (рис. 6) в каждый образец-куб были заформованы два провода (по диагонали образца), рабочие (оголенные) концы проводов утоплены в тело образца на глубину 2 см. Твердение образцов проходило при влажности 90 % и комнатной температуре. Внешний вид образцов представлен на рис. 7. Была создана цепь, которая вклю-

Рис. 5. Микрофотография технического углерода П 234 с указанием зон отбора проб для спектрального анализа

Рис. 6. Определение электропроводности образцов

Таблица 5
**Содержание углерода в образце
технического углерода П 234 по зонам
отбора проб (весовые %)**

Зона отбора проб	Углерод
Спектр 1	97,21
Спектр 2	94,74
Спектр 3	89,82
Спектр 4	86,38
Спектр 5	93,48
Спектр 6	98,76
Спектр 7	95,83
Спектр 8	86,83
Спектр 9	87,99
Спектр 10	80,00

Рис. 7. Образцы электропроводящего бетона для испытаний на электропроводность

чает источник питания, лампочку на 12 В и образец. Лампочку поместили на образец-куб, затем к ней подключили провод, соединенный с источником питания. Цепь замыкалась проводом, соединяющим образец и источник питания.

Проведенные исследования показали необходимость изучения электропроводности составов [13] с содержанием графита 15 % и более от массы цемента, у которых были выявлены показатели устойчивого напряжения [14]. Физико-механические испытания было решено провести

с введением токопроводящего компонента 15 % от массы цемента.

В нашем исследовании для определения морозостойкости и предела прочности при сжатии были заформованы образцы-кубы размерами 10×10×10 см. Для определения водонепроницаемости формовали образцы-цилиндры. Также формовали контрольный состав без введения токопроводящего компонента.

На рис. 8 представлены образцы структуры композиционного материала после испытания на гидравлическом прессе (ГЛ-1 и П 234), а в табл. 6 — результаты определения характеристик образцов.

Рис. 8. Структура электропроводящего бетона

Таблица 6

**Физико-механические характеристики бетона, полученные экспериментально
для каждого из составов**

Составы	Плотность, кг/м ³	Водонепроницае- мость	Прочность при сжатии, МПа	Морозостойкость
Токопроводящий наполнитель П 234	2351	W2	24,92	F300
Токопроводящий наполнитель Т 900	2337	W8	35,99	F300
Токопроводящий наполнитель ГЛ-1	2350	W2	27,9	F300
Контрольный, без токопроводящего наполнителя	2365	W6	39,85	F300

На основании проведенных исследований наиболее эффективным токопроводящим компонентом следует считать технический углерод Т 900, применение которого в электропроводящем бетоне не приводит к заметному снижению прочности и при этом увеличивает показатель водонепроницаемости.

Библиографический список

1. Фролова О. Дороги с подогревом: практическое решение для стран с холодным климатом // Интернет-журнал для путешественников. 2018. URL: <https://travelask.ru/blog/posts/13638-dorogi-s-podogrevom-praktichnoe-reshenie-dlya-stran-s-holodn> (дата обращения: 06.10.2020).
2. Сычёв С. А., Бадьин Г. М. Перспективные технологии строительства и реконструкции зданий. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань, 2019. 368 с.
3. Подъяпольская Е. Ю., Дмитриев С. М., Долженков В. А. Разработка состава электропроводящего цементобетона и анализ методов его применения в дорожной отрасли // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2020. № 2 (24). URL: <https://www.adi-madi.ru/madi/issue/view/24> (дата обращения: 23.08.2020).
4. Лопанов А. Н., Фанина Е. А., Томаровищенко О. Н. Физико-химические аспекты получения токопроводящих смесей для производства нагревательных систем и элементов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 11. С. 168–172.
5. Yehia S. A., Tuan C. Y. Airfield Pavement Deicing with Conductive Concrete Overlay // Civil Engineering Faculty Proceedings & Presentations. Paper 2. 2002. URL: <https://www.academia.edu/30879700/>.
6. Подъяпольская Е. Ю., Дмитриев С. М., Долженков В. А. Применение электропроводящего бетона в конструктивных элементах городских дорог и улиц для борьбы с зимней скользкостью // Дороги и мосты: сб. науч. тр. ФАУ «РосдорНИИ». 2019. № 41. С. 262–270. URL: http://rosdornii.ru/documents/sbornik/41/?PAGEN_1=2 (дата обращения: 10.09.2020).
7. Dvorkin L. I. Modified water-cement ratio rule for the design of air-entrained concrete // Инженерно-строительный журнал. 2019. № 1 (85). С. 123–135.

8. Лхасаранов С. А., Урханова Л. А., Буянтуев С. Л., Хмелев А. Б. Исследование влияния углеродных наноматериалов на изменение структуры и фазового состава цемента и бетона // Вестник Бурятского гос. ун-та. Химия. Физика. 2017. № 2–3. С. 24–28.

9. Кубанова А. Н., Гвоздев А. Е. История развития порошковой металлургии и ее применение в современных технологиях // Чебышевский сборник. 2021. Т. 22. № 2 (78). С. 437–448.

10. Чмутин И. А., Рывкина Н. Г., Соловьева А. Б., Кедрина Н. Ф., Тимофеева В. А., Рожкова Н. Н., McQueen D. H. Особенности электрических свойств композитов с шунгитовым наполнителем // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2004. № 6 (46). С. 1061–1070.

11. Денисюк И. Ю., Успенская М. В., Фокина М. И., Логушкова К. Ю. Электропроводящая композиция бетона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. № 1 (18). С. 158–162.

12. Лопанов А. Н., Фанина Е. А., Гузеева О. Н. Регулирование электрических и реологических свойств гетерогенных систем на основе кварцевого песка и графита механической активацией кварцевого песка // Вестник МГСУ. 2016. № 8. С. 78–87.

13. Фанина Е. А., Лопанов А. Н. Электропроводящие конструкционные материалы строительного назначения // Вестник МГСУ. 2009. № 4. С. 258–261.

14. Гузеева О. Н. Эффективность применения переходных форм углерода при получении сухих наполненных токопроводящих смесей // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 8. С. 19–22.

References

1. Frolova O. *Dorogi s podogrevom: praktichnoe reshenie dlya stran s kholodnym klimatom* [Heated roads: a practical solution for countries with a cold climate]. *Internet-zhurnal dlya puteshestvennikov – Online magazine for travelers*, 2018. Available at: <https://travelask.ru/blog/posts/13638-dorogi-s-podogrevom-praktichnoe-reshenie-dlya-stran-s-holodn> (accessed: 06.10.2020).

2. Sychov S. A., Bad'in G. M. *Perspektivnye tekhnologii stroitel'stva i rekonstruktsii zdaniy* [Perspective technologies of construction and reconstruction of buildings]. 2-nd ed., revised. St. Petersburg, Lan' Publ., 2019, 368 p.

3. Pod'yapol'skaya E. Yu., Dmitriev S. M., Dolzhenkov V. A. *Razrabotka sostava elektroprovodyashchego tsementobetona i analiz metodov ego primeneniya v dorozhnoy otrasli* [Development of the composition of electrically conductive cement concrete and analysis of methods of its application in the road industry]. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura – Automobile. Road. Infrastructure*,

2020, no. 2 (24). Available at: <https://www.adi-madi.ru/madi/issue/view/24> (accessed: 23.08.2020).

4. Lopanov A. N., Fanina E. A., Tomarovshchenko O. N. *Fiziko-khimicheskie aspekty polucheniya tokoprovodyashchikh smesey dlya proizvodstva nagrevatel'nykh sistem i elementov* [Physical and chemical aspects of obtaining conductive mixtures for the production of heating systems and elements]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova – Bulletin of V. G. Shukhov BSTU*, 2016, no. 11, pp. 168–172.

5. Yehia S. A., Tuan C. Y. *Airfield pavement deicing with conductive concrete overlay*. Civil Engineering Faculty Proceedings & Presentations. Paper 2, 2002. Available at: <https://www.academia.edu/30879700/>.

6. Pod'yapol'skaya E. Yu., Dmitriev S. M., Dolzhenkov V. A. *Primenenie elektroprovodyashchego betona v konstruktivnykh elementakh gorodskikh dorog i ulits dlya bor'by s zimney skol'zkost'yu* [Application of electrically conductive concrete in structural elements of city roads and streets to combat winter slipperiness]. *Trudy FAU RosdornII «Dorogi i mosty» – Proceedings of the FAU RosdornII «Roads and bridges»*, 2019, no. 41, pp. 262–270. Available at: http://rosdornii.ru/documents/sbornik/41/?PAGEN_1=2 (accessed: 10.09.2020).

7. Dvorkin L. I. Modified water-cement ratio rule for the design of air-entrained concrete. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Civil Engineering Journal*, 2019, no. 1 (85), pp. 123–135.

8. Lkhasaranov S. A., Urkhanova L. A., Buyantuev S. L., Khmелеv A. B. *Issledovanie vliyaniya uglerodnykh nanomaterialov na izmenenie struktury i fazovogo sostava tsementa i betona* [Investigation of the influence of carbon nanomaterials on changes in the structure and phase composition of cement and concrete]. *Vestnik Buryatskogo gos. un-ta. Khimiya. Fizika – Bulletin of the Buryat State University. Chemistry. Physics*, 2017, no. 2–3, pp. 24–28.

9. Kubanova A. N., Gvozdev A. E. *Istoriya razvitiya poroshkovoy metallurgii i ee primeneniye v sovremennykh tekhnologiyakh* [History of powder metallurgy development and its application in modern technologies]. *Chebyshevskiy sbornik – Chebyshev Collection*, 2021, vol. 22, no. 2 (78), pp. 437–448.

10. Chmutin I. A., et al. *Osobennosti elektricheskikh svoystv kompozitov s shungitovym napolnitelem* [Features of electrical properties of composites with shungite filler]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A – High-molecular compounds. Series A*, 2004, no. 6 (46), pp. 1061–1070.

11. Denisyuk I. Yu., Uspenskaya M. V., Fokina M. I., Logushkova K. Yu. *Elektroprovodyashchaya kompozitsiya betona* [Electrically conductive composition of concrete]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki – Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, no. 1 (18), pp. 158–162.

12. Lopanov A. N., Fanina E. A., Guzeeva O. N. *Regulirovanie elektricheskikh i reologicheskikh svoystv geterogennykh sistem na osnove kvartseвого песка i grafita mekhanicheskoy aktivatsiei kvartseвого песка* [Regulation of electrical and rheological properties of heterogeneous systems based on quartz sand and graphite by mechanical activation of quartz sand]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2016, no. 8, pp. 78–87.

13. Fanina E. A., Lopanov A. N. *Elektroprovodyashchie konstruktsionnye materialy stroitel'nogo naznacheniya*

[Electrically conductive structural materials for construction purposes]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2009, no. 4, pp. 258–261.

14. Guzeeva O. N. *Effektivnost' primeneniya perekhodnykh form ugleroda pri poluchenii sukhikh napol'nykh tokoprovodyashchikh smesey* [The effectiveness of using transitional forms of carbon in the production of dry floor conductive mixtures]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova – Bulletin of V. G. Shukhov BSTU*, 2016, no. 8, pp. 19–22.