



Электропроводящий нагреваемый цементобетон на основе графита

С. А. Куюков ✉, П. Ю. Третьяков, А. А. Тестешев, А. В. Замятин, А. А. Жигайлов
Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, Тюмень, 625000, Российская Федерация

✉ kujukovsa@tyuiu.ru

Аннотация. Срок службы сооружения в гражданском и дорожном строительстве во многом зависит от качества и свойств применяемых строительных и дорожно-строительных материалов. Улучшение свойств уже известных и применяемых материалов, в частности, цементобетона, является одной из приоритетных задач ученых. Цель работы: получение цементобетона, обладающего электропроводящими свойствами, обеспечивающими его нагрев при прохождении электрического тока за счет применения углеродосодержащих добавок, и оценка влияния добавок на прочностные свойства. Объект исследования – состав цементобетона с содержанием графита. Проведение лабораторных исследований выполнено в 4 этапа. На первом этапе с учетом специфики применяемых компонентов были разработаны составы цементобетона класса В15. На основе разработанных составов проведен второй этап исследований, заключающийся в изготовлении серии образцов цементобетонной смеси для тяжелого бетона класса В15 с различным содержанием графита, а именно: 0, 33, 50, 66 и 100 %. На третьем этапе проведены испытания образцов на прочность при сжатии в водонасыщенном состоянии. Заключительный, четвертый, этап предусматривал оценку электропроводящих и температурных характеристик цементобетонных образцов с содержанием графита. Анализ полученных результатов исследования показал, что с увеличением содержания графита в цементобетонной смеси повышаются его электропроводящие свойства, при прохождении электрического тока цементобетон нагревается. Вместе с тем, содержание графита в цементобетоне снижает его прочностные свойства. Практическая значимость работы заключается в разработке составов электропроводящего цементобетона, соответствующего заданному классу по прочности.

Ключевые слова: электропроводящий бетон, цементобетон, дорожное строительство, порошкообразный графит, прочность, теплопроводность

Для цитирования: Куюков С. А., Третьяков П. Ю., Тестешев А. А., Замятин А. В., Жигайлов А. А. Электропроводящий нагреваемый цементобетон на основе графита. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(4):77–87. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-4-77-87>

Electrically conductive cement concrete using graphite

Sergey A. Kuyukov ✉, Peter U. Tretyakov, Alexander A. Testeshev, Alexey V. Zamyatin, Alexander A. Zhigailov
Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russian Federation

✉ kujukovsa@tyuiu.ru

Abstract. In civil and road construction, the service life of structures is heavily influenced by the quality and properties of the construction and road-building materials used. Improving the properties of existing and commonly used materials, particularly concrete, is a high research priority. This work aims to produce

electrically conductive concrete using carbonaceous additives and to assess the effect of these additives on compressive strength. The research focused on cement concrete mixes containing graphite. Laboratory testing was conducted in four stages. In the first stage, B15 concrete mixes were designed, considering the specific characteristics of the components. Based on the developed formulations, the second stage of the research involved the production of a series of heavy B15 concrete samples with varying graphite content: 0%, 33%, 50%, 66%, and 100%. The third stage involved compressive strength testing of the samples while saturated with water. Finally, the electrical and thermal characteristics of the graphite-containing samples were evaluated. Analysis showed that increasing graphite content improves electrical conductivity, enabling electrical heating of the concrete. However, increased graphite content also reduces compressive strength. The practical significance of this work lies in the development of electrically conductive concrete mixes that meet specified strength requirements.

Keywords: electrically conductive concrete, cement concrete, road construction, powdered graphite, strength, thermal conductivity

For citation: Kuyukov S. A., Tretyakov P. U., Testeshev A. A., Zamyatin A. V., Zhigailov A. A. Electrically conductive cement concrete using graphite. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(4):77–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-4-77-87>



1. Введение

В последнее время наука работает над улучшением свойств строительных материалов с содержанием цемента. Одним из таких материалов является дорожный цементогрунт. Исследовательские работы, описанные в [1, 2], направлены на поиск способов повышения долговечности дорожного цементогрунта за счет применения различных модифицирующих добавок. Другим наиболее распространенным материалом, применяемым в строительстве, является цементобетон. Цементобетон – строительный материал, состоящий из смеси щебня, песка, цемента и воды, подобранных в оптимальном соотношении, а также различных добавок, улучшающих его свойства. Данный материал нашел применение во многих областях, в частности, в дорожном, гражданском, гидротехническом и промышленном строительстве.

Несмотря на то, что цементобетон применяется уже более 200 лет, до сих пор ученые-материаловеды работают над улучшением его свойств, таких как прочность, долговечность, теплопроводность, пожаростойкость и других. Исследуется возможность применения техногенных отходов промышленности для производства композиционных вяжущих [3, 4]. Активно изучается вопрос применения модифицирующих добавок, влияющих на сроки схватывания [5], реологические и физико-технические свойства [6].

Относительно новым направлением является изучение способов изменения свойств цементобетона, позволяющих придать ему электропроводящие свойства и способность нагреваться за счет сопротивления электрическому току.

Получение электропроводящего бетона (ЭПБ) – одно из перспективных направлений улучшения характеристик цементобетона. Опубликовано немало работ, целью которых являлся анализ составов электропроводящего бетона, сравнение его с традиционными бетонами [7, 8]. Ведутся прикладные исследования, авторы рассматривают возможность конкретного применения электропроводящих бетонов в дорожной инфраструктуре для устройства тротуаров и дорожного освещения [9, 10]. Проводятся лабораторные исследования электропроводящего бетона, направленные на оценку электрических свойств [11, 12]. Изучаются различные добавки, в том числе комплексные, позволяющие получить электропроводящий бетон [13, 14]. В качестве наиболее распространенной добавки, влияющей на электропроводящие свойства, исследователи применяют углеродсодержащие материалы (технический углерод, графит) [15, 16]. Отдельно стоит отметить один из самых перспективных наноматериалов – графен, имеющий пока высокую себестоимость, но позволяющий получить сверх-

прочные тонкослойные покрытия [17]. Вопросами ЭПБ занимались и зарубежные исследователи, которые в качестве добавок использовали углеродное и стальное волокно [18], волокно из углеродистой стали [19], углеродные нанотрубки для придания композитным материалам электропроводящих свойств [20]. Проведены исследования, посвященные вопросам технологии приготовления ЭПБ [21], в рамках работы рассмотрены особенности перемешивания компонентов при приготовлении цементобетонной смеси. Перспективность исследований в области придания теплопроводных свойств материалам, получения самонагреваемых конструкций подтверждается интересом ученых-материаловедов не только к цементобетонам, но и к асфальтобетонам [22].

Результатом проведения патентного поиска является способ получения электропроводящего бетона с широким диапазоном величин удельного сопротивления (патент RU 2291130¹). В патенте представлены результаты механических и электрических испытаний образцов. Выявлена зависимость, показывающая, что при увеличении количества порошкообразного графита уменьшаются конструктивные свойства бетона. Однако неясно, каким образом получены пропорции соотношения масс компонентов в смеси для приготовления образцов и какие прочностные показатели получены при испытаниях, какое влияние оказала добавка.

Несмотря на активное изучение вопроса получения ЭПБ и достигнутые результаты, направление является перспективным, требующим более глубокого исследования, выявления недостатков и разработки путей решения. Получение ЭПБ, отвечающего всем требованиям, имеет огромные перспективы применения. Наиболее явной областью применения являются объекты транспортной инфраструктуры: проезжие части улиц, дорог, мостов, пешеходные переходы, тротуары, взлетно-посадочные полосы аэропортов и т. д. Применение ЭПБ на указанных объектах выведет на совершенно новый уровень мероприятия по борьбе со скользкостью, позволит предотвратить появление гололеда на дорожных покрытиях, повысить безопасность, снизить аварийность, сохранить жизни участникам дорожного движения. Особенно это актуально для районов с частыми гололедными явлениями. Есть и примеры применения ЭПБ на реальных объектах. В городе Линкольн (штат Небраска, США) построен первый в мире мост через реку Солт-Крик с использованием токопроводящего бетона для борьбы с гололедом. Многолетние наблюдения за сооружением показывают эффективность работы конструкции [23]. Несмотря на опыт применения ЭПБ, материал не нашел широкого применения по ряду причин, основной из которых, по мнению авторов, является высокая стоимость электропроводящих добавок и отсутствие готовых конструктивных и технологических решений, а также отсутствие методологии определения электропроводности бетонных конструкций [24].

В связи с этим целью, поставленной авторами, явилось получение цементобетона, обладающего электропроводящими свойствами, обеспечивающими его нагрев при прохождении электрического тока за счет применения углеродосодержащей добавки, и оценка влияния содержания добавки на прочностные свойства.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Произведен сбор и анализ информации о представленных на рынке углеродосодержащих материалах, придающих цементобетону электропроводящие свойства. Изготовлена серия образцов цементобетона без графита и четыре серии образцов цементобетона с различным содержанием порошкообразного графита с полной либо частичной заменой мелкого заполнителя – песка.

¹ Патент RU 2291130 C1, МПК С04В 28/04, С04В 111/94. Способ получения электропроводящего бетона: № 2005118294/03: заявл. 2005.06.14: опубл. 2007.01.10 / Петров Ю. С., Киргуев А. Т., Соколов А. А. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002291130_20070110_C1_RU/ (дата обращения: 05.08.2024).

2. Проведена оценка электропроводящих свойств образцов путем пропускания электрического тока с фиксацией силы тока, напряжения и температуры нагрева образцов.
3. Выполнено испытание водонасыщенных образцов всех серий на прочность, определена прочность образцов на сжатие.

2. Материалы и методы

В роли углеродосодержащего материала в цементобетонной смеси был выбран природный порошкообразный графит. Выбор был обусловлен стоимостью и доступностью на рынке.

Порошкообразный графит – мелкодисперсный материал, не обладающий активностью, с низким коэффициентом теплового расширения и высоким уровнем устойчивости к температурным напряжениям. Он содержит в составе малое количество азота по причине термообработки при высоких температурах.

На предварительном этапе лабораторных исследований решался вопрос о дозировке графита. Так как насыпная плотность графита более чем в 5 раз меньше насыпной плотности песка, варьирование в большом массовом соотношении приводило к существенному нарушению гранулометрического состава цементобетонной смеси. В связи с этим было принято решение о применении графита в процентах от мелкого заполнителя (песка), частично либо полностью заменяя его в смеси.

Основной этап лабораторного эксперимента проводился в четыре этапа.

Изначально были проведены испытания исходных материалов с целью определить физико-механические характеристики в соответствии с действующими нормативными документами.

На первом этапе проводилось проектирование составов цементобетона на основании руководства по подбору составов тяжелого бетона с использованием общедоступных калькуляторов расчета. В качестве основополагающего класса бетона по прочности был принят класс бетона В15, чаще всего применяемый в разных областях строительства.

С учетом запроектированного состава цементобетонной смеси были сформированы составы с применением графита.

На втором этапе были изготовлены пять серий образцов кубической формы из цементобетонной смеси для тяжелого бетона класса В15 с различным содержанием графита, а именно: 0 % (контрольные образцы), 33 % (соотношение графита и песка 1:2); 50 % (соотношение графита и песка 1:1); 66 % (соотношение графита и песка 2:1); 100 % (полная замена песка графитом).

Набор прочности продолжительностью 72 часа осуществлялся в пропарочной камере при температуре 60 °С.

После набора прочности цементобетонных образцов, на третьем этапе, проводились испытания на прочность при сжатии в водонасыщенном состоянии в соответствии с действующими нормативными документами.

Заключительный, четвертый, этап включал в себя оценку электропроводящих характеристик и нагрева цементобетонных образцов с содержанием графита. Для этого была собрана электрическая цепь, включающая в себя последовательно соединенные источник тока, электроды, между которыми закрепляются образцы ЭПБ, и приборы для измерения основных электрических характеристик (рис. 1, 2).

При проведении испытаний фиксировались величины силы тока и напряжения в цепи. По известным зависимостям определялось сопротивление.

3. Результаты и обсуждение

Данные, полученные при испытании цементобетонных образцов на прочность, представлены в виде графика зависимости прочности образцов от содержания графита в смеси (рис. 3).

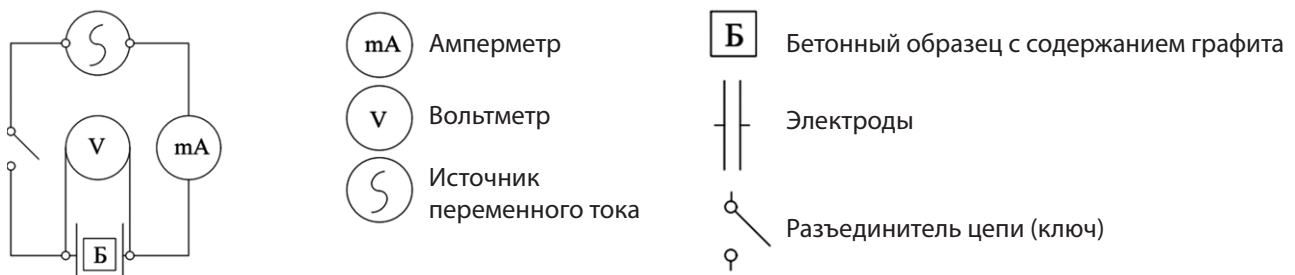


Рис. 1. Электрическая схема для оценки электропроводящих характеристик
Fig. 1. Electrical circuit for evaluating conductivity

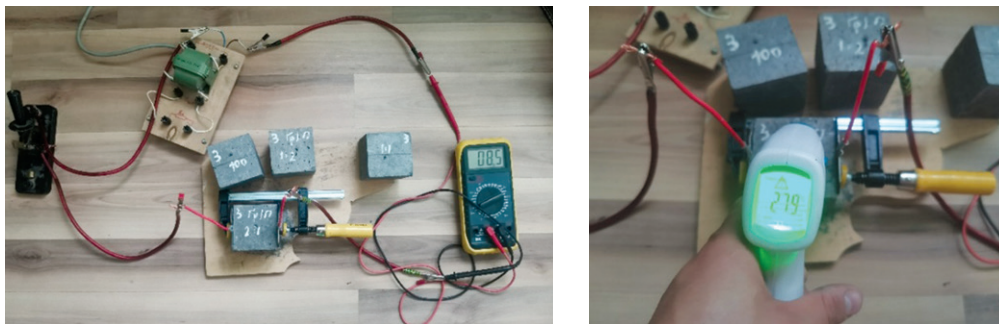


Рис. 2. Собранная электрическая цепь и определение температуры нагрева бетонных образцов (фото авторов)

Fig. 2. The assembled electrical circuit and measurement of concrete sample heating temperature (author's photo)



Рис. 3. Результаты испытания опытных бетонных образцов на прочность при сжатии с различным содержанием графита (график составлен авторами)
Fig. 3. Results of compressive strength testing of experimental concrete samples with different graphite contents (graph prepared by the authors)

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что наличие графита снижает прочностные характеристики цементобетона. При полной замене песка графитом прочность образцов сократилась более чем в 5 раз. Это обусловлено характеристиками графита, а именно его низким коэффициентом трения. При добавлении графита в смесь увеличивается площадь контакта между частицами и снижается сопротивление трению. Также стоит отметить разницу в гидрофильности графита и цемента, результатом которой явилось снижение сцепления частиц материалов между собой.

Результаты испытания образцов на прочность подтверждают жизнеспособность методики подбора состава тяжелого бетона с применением графита. Для получения требуемой прочности бетона необходимо корректировать зерновой состав цементобетонной смеси, увеличивать количество цемента с учетом внесения дополнительной добавки.

В рамках проведения четвертого этапа лабораторных исследований получены зависимости между содержанием графита в цементобетоне и его электрическими характеристиками.

Анализируя полученные данные, представленные на рис. 4, видно, что при увеличении содержания графита в цементобетоне увеличивается электрическое сопротивление. При этом полученный график позволяет говорить о двух характерных участках: при дозировке графита до 50 % от массы песка зависимость слабовыраженная; при дозировке графита более 50 % от массы песка зависимость носит резко изменяющийся характер. При полной замене песка на графит сопротивление составило 244.4 кОм.

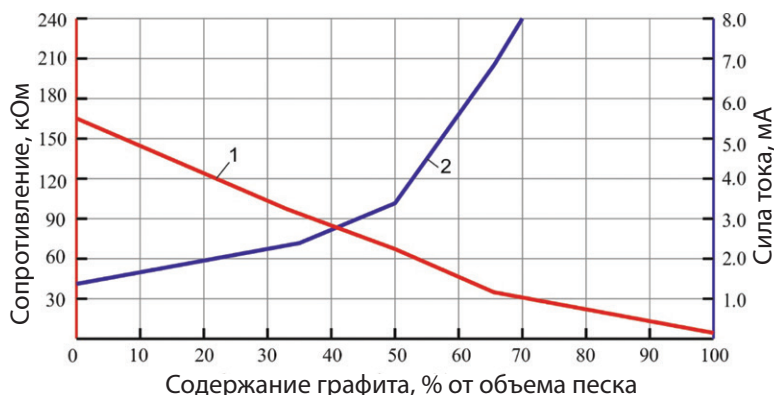


Рис. 4. Результаты определения электропроводящих характеристик опытных бетонных с различным содержанием графита
1 – Сила тока, мА; 2 – Сопротивление, кОм (график составлен авторами)
Fig. 4. Results of the conductivity characteristics determination of experimental concrete samples with varying graphite content: 1 – Current, mA; 2 – Resistance, kΩ (graph prepared by the authors)

При прохождении электрического тока через исследуемый образец происходил нагрев, фиксируемый пирометром. Максимальное время нагрева образца составляло 1 час, что обуславливалось его теплоемкостью. Образцы без графита при пропускании через них электрического тока не нагревались. Испытания проводились при комнатной температуре ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Результаты проведения испытаний представлены на рис. 5 в виде зависимости температуры образца от времени нагрева.

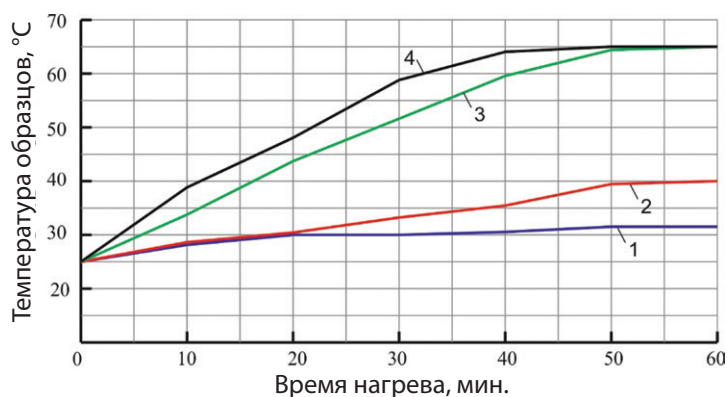


Рис. 5. Результаты нагрева цементобетона класса В15 с различным содержанием графита: 1 – 33%; 2 – 50%; 3 – 66%; 4 – 100% (график составлен авторами)
Fig. 5. Heating results for B15 concrete with varying graphite content: 1 – 33%; 2 – 50%; 3 – 66%; 4 – 100% (graph prepared by the authors)

Анализируя графики, следует отметить, что время нагрева и температура цементобетонных образцов зависят от количества графита в составе цементобетонной смеси.

Изменение температуры образца (ΔT , $^{\circ}\text{C}$) при содержании графита в смеси 33 % от массы песка составило 6.2 $^{\circ}\text{C}$, при содержании графита 50 % – 15.2 $^{\circ}\text{C}$, при содержании графита 66 и 100 % – 40.0 $^{\circ}\text{C}$. При этом скорость нагрева образцов практически не зависит от содержания графита в смеси. Время нагрева образцов до максимальной температуры при всех содержаниях графита составило около 50 минут.

Выявленные закономерности объясняются тем, что при перемешивании графитового порошка и минерального вяжущего с последующей гидратацией происходит заполнение пор бетонной

смеси микрочастицами, что повышает сцепные свойства обоих компонентов. При увеличении количества графита в смеси его частицы образуют объемную сеть, снижающую сопротивление и повышающую теплопроводность материала в целом.

Анализируя данные лабораторных испытаний цементобетонных образцов с добавками графита, можно констатировать положительное влияние графита на электропроводящие свойства, позволяющие при прохождении электрического тока через бетон увеличивать его температуру, при этом чем больше графита в цементобетоне, тем более интенсивный нагрев. Но вместе с тем наличие графита в цементобетоне снижает прочность, переводя его в более низкий класс. Так, при содержании графита 33 % от массы песка класс цементобетона снижается до В10, при 50 % графита – до В7.5, при 66 и 100 % графита класс цементобетона ниже В7.5 (рис. 6).

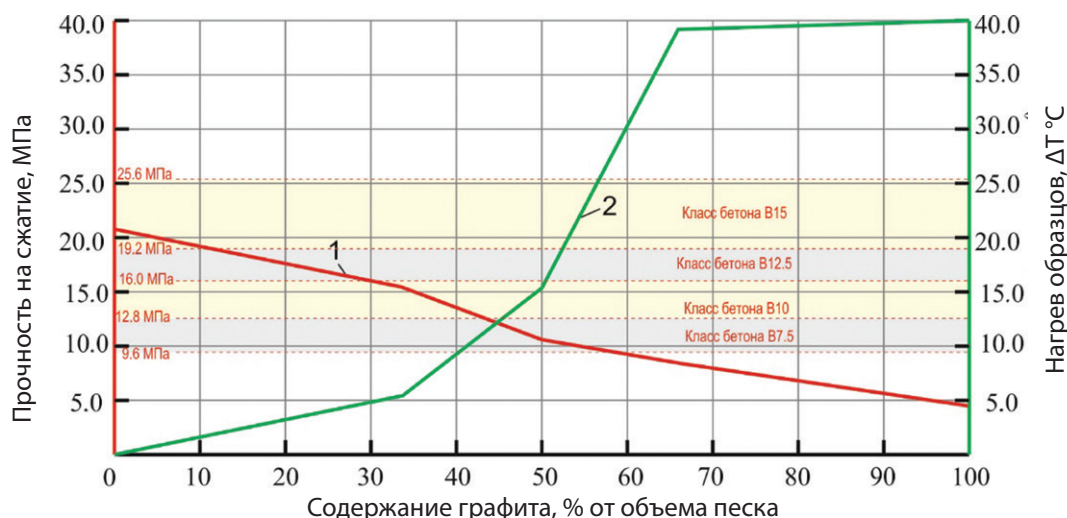


Рис. 6. Зависимость прочности на сжатие и температуры нагрева от содержания графита в бетонных образцах:

1 – прочность на сжатие опытных бетонных образцов, МПа;
2 – изменение температуры опытных бетонных образцов, ΔТ, °С (график составлен авторами)

Fig. 6. Relationship between compressive strength and heating temperature as a function of graphite content in concrete samples:

1 – Compressive strength of experimental concrete samples (MPa);
2 – Change in temperature of experimental concrete samples (ΔT, °C) (graph prepared by the authors)

4. Заключение

Результаты экспериментальных исследований цементобетонных образцов с различным содержанием графита в лабораторных условиях позволяют сформировать следующие выводы:

1. Наличие графита в цементобетоне придает ему электропроводящие свойства, способствующие нагреву материала при прохождении электрического тока. При этом чем больше графита в смеси, тем интенсивнее происходит нагрев цементобетона:

- образцы, в качестве мелкого заполнителя в которых применялся графит, увеличили температуру на 40 °С за 45 минут;
- образцы, содержащие в качестве мелкого заполнителя смесь песок – графит в соотношении 1:2, увеличили температуру на 40 °С за 55 минут;
- образцы, содержащие в качестве мелкого заполнителя смесь песок – графит в соотношении 1:1, увеличили температуру на 15 °С за 50 минут;
- образцы, содержащие в качестве мелкого заполнителя смесь песок – графит в соотношении 2:1, увеличили температуру на 6 °С за 50 минут;

- образцы без графита при пропускании через них электрического тока не нагревались.
- 2. Наличие графита в цементобетоне привело к снижению прочности материала:
- средняя прочность серии образцов без графита составила 21.2 МПа, что соответствует классу бетона В15;
- средняя прочность серии образцов с соотношением песка и графита 2:1 составила 15.7 МПа, что соответствует классу бетона В10;
- средняя прочность серии образцов с соотношением песка и графита 1:1 составила 10.8 МПа, что соответствует классу бетона В7.5;
- средняя прочность серии образцов с соотношением песка и графита 1:2 составила 8.1 МПа, материал имеет прочность, не достаточную для присвоения класса;
- средняя прочность серии образцов с графитом, заменяющим песок, составила 4.8 МПа, материал имеет прочность, не достаточную для присвоения класса.

Таким образом, с учетом полученных данных можно сделать вывод, что применение графита в цементобетоне придает материалу электрические свойства, способствующие самонагреву при пропуске электрического тока, вместе с тем наличие графита в цементобетоне снижает его прочность. Зависимость между нагревом и прочностью при разном содержании графита обратно пропорциональная. Несмотря на недостатки применения графита, его использование для получения самонагреваемого цементобетона перспективно, но требует продолжения исследований, направленных на оптимизацию составов смесей, оценку экономической эффективности применения, разработку конструктивных и технологических решений, позволяющих применять материал на объектах.



Вклад авторов. Куюков С. А. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы. Третьяков П. Ю. – разработка программы лабораторных исследований, руководство лабораторными исследованиями по оценке электропроводности. Тестешев А. А. – изучение состояния вопроса, развитие методологии. Замятин А. В. – разработка программы лабораторных исследований, руководство лабораторными исследованиями по оценке прочностных характеристик. Жигайлов А. А. – изучение состояния вопроса, доработка текста.

Author contributions. Sergey A. Kuyukov provided scientific guidance; developed the research concept and methodology; wrote the source text; formulated the final results. Peter U. Tretyakov developed the laboratory research program; supervised the laboratory research on conductivity assessment. Alexander A. Teteshev studied the issue; contributed to the development of the methodology. Alexey V. Zamyatin developed the laboratory research program; supervised the laboratory research on strength characteristic assessment. Alexander A. Zhigaylov conducted a literature review; refined the text.

Конфликт интересов. Авторы сообщают об отсутствии коммерческой заинтересованности в каком-либо продукте или концепции, обсуждаемых в этой статье.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest regarding any product or concept discussed in this article.

Список литературы

1. Санников С. П., Куюков С. А., Жигайлов А. А. Оценка комплексного влияния нагрузки при уплотнении и материала «Типром У» на свойства цементогрунта. В сб.: *Актуальные проблемы архитектуры, строительства, энергоэффективности и экологии – 2016. Т. I*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2016. С. 144–149.
2. Sannikov S., Kuyukov S., Zamyatin A., Zhigailov A. The appliance of prefabricated soil-cement slabs processed with a hydrophobizing material for the road construction. In: *MATEC Web of Conferences: XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering*. 2018;196:04026. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819604026>
3. Aimenov Zh. T., Aimenov A. Z., Erofeev V. T., Sabitov L. S., Sanyagina Ya. A. The effect of modifying additives on the performance properties of slag-alkali binders and concretes. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024;20(1):162–170. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-1-162-170>

4. Рябчевский И. С. Производство ячеистых бетонов с использованием летучей золы. В сб.: *VI Международный студенческий строительный форум – 2021. Белгород, 26 ноября 2021 года. Т. 2.* Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова; 2021. С. 175–178.
5. Altynbekova A. D., Lukranov R. E., Dyusseminov D. S., Tokanov D. T., Orazova D. K. Influence research of modified additives on concrete properties. *Труды университета.* 2023;(4):188–194. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2023_4_188.
6. Uteпов Ye. B., Akhmetov D. A., Akhmatshaeва I. T., Root Ye. N. Study of the influence of fine fillers from technogenic waste and chemical additives on the properties of self-compacting concrete. *Комплексное использование минерального сырья.* 2019;(4):64–73. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.39>
7. Fediuk R. S., Stoyushko N. Yu., Gladkova N. A., Garmashov I. S., Batarshin V. O. Research on electrically conductive concrete. В сб.: *Третий междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием «Новые материалы», Москва, 21–24 ноября 2017 г.* Москва: Буки Веди, 2017. С. 654–657. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34983326>.
8. Агунов А. В., Терехин И. А., Баранов И. А. Анализ применения электропроводящих бетонов электроэнергетике. *Транспортные системы и технологии.* 2021;7(2):5–15. <https://doi.org/10.17816/transsyst2021725-15>
9. Иванова Т. А., Колесникова Л. Г., Петрова Т. М. Электропроводящий бетон для тротуаров и пешеходных дорожек. *Вестник гражданских инженеров.* 2021;(6):96–104. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-6-96-104>
10. Шишкин Н. О., Угланова А. Е., Зорина О. А. Применение электропроводящего бетона в освещении дорожного покрытия. В сб.: *Молодые – Научам о Земле: Тезисы докладов X Международной конференции молодых ученых. Москва, 31 марта – 01 апреля 2022 г. В 7-ми томах. Том 7.* Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе. 2022;7:280–283.
11. 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):7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43921411>.
12. Урханова Л. А., Урханова А. А., Лхасаранов С. А., Смирнягина Н. Н. Исследование электропроводящих свойств бетона. В сб.: *Строительное материаловедение: Настоящее и будущее: Сборник материалов I Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию выдающегося ученого-материаловеда, академика РААСН Ю. М. Баженова, Москва, 01–02 октября 2020 г.* Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 2020. С. 279–281.
13. Васильюк Ю. И. Разработка состава и возможности применения электропроводящего бетона. В сб.: *Серия «Строительство»: Сборник статей магистрантов и аспирантов. В 2-х томах. Т. 2. Выпуск 3.* Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; 2020. С. 247–256.
14. Денисюк И. Ю., Успенская М. В., Фокина М. И., Логушкова К. Ю. Электропроводящая композиция бетона. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* 2018;18(1):158–162. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-1-158-162>
15. Ибрагимова Д. Ф. Исследование свойств бетона с добавкой технического углерода. *Молодой ученый.* 2023;(19):96–99. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/466/102408/>.
16. Фанина Е. А., Лопанов А. Н. Электропроводность и агрегация частиц антрацита и графита в бетонах. *Химия твердого топлива.* 2009;(1):46–50. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11685406>.
17. Гойсис М. Графен: новые возможности для бетона. *Цемент и его применение.* 2020;(1):108–115. Режим доступа: <https://jcement.ru/magazine/vypusk-1-2020/grafen-novye-vozmozhnosti-dlya-betona/>.
18. Xie P., Gu P., Beaudoin J. J. Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres. *Journal of Materials Science.* 1996;31(15):4093–4097. <https://doi.org/10.1007/bf00352673>
19. Bai Y. H., Tu R., Chen W., Chen B. Research on electrically conductive concrete with double-layered stainless steel fibers for pavement deicing. *ACI Materials Journal.* 2017;114(6):935–943. <https://doi.org/10.14359/51700993>
20. Yoo D.-Y., You I., Lee S.-J. Electrical properties of cement-based composites with carbon nanotubes, graphene, and graphite nanofibers. *Sensors.* 2017;17(5):1064–1076. <https://doi.org/10.3390/s17051064>
21. Rahman Md. L., Malakooti A., Ceylan H., Kim S., Taylor P. C. Identifying the best mixing procedure practice for ready-mix concrete plant production of carbon fibre reinforced electrically conductive concrete. *International Journal of Pavement Engineering.* 2023;24(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2225119>
22. Notani M. A., Arabzadeh A., Ceylan H., Gopalakrishnan K., Kim S. Effect of carbon-fiber properties on volumetrics and ohmic heating of electrically conductive asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering.* 2019;31(9):04019200. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002868](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002868)
23. Yehia Sh., Tuan C. Y. Thin conductive concrete overlay for bridge deck deicing and anti-icing. *Transportation Research Record.* 2000;1698(1):45–53. <https://doi.org/10.3141/1698-07>

24. Rybin P. K., Terekhin I. A., Baranov I. A. Methodology for the experimental evaluation of the conductive properties of concrete structures for sustainable transport development. *Transportation Research Procedia*. 2023;68:688–693. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.095>

References

1. Sannikov S. P., Kuyukov S. A., Zhigailov A. A. Evaluation of the combined influence of compaction load and "Tiprom U" material on the properties of soil cement. In: *Topical issues in architecture, construction, energy efficiency, and ecology – 2016. Vol. 1*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2016. P. 144–149. (In Russ.)
2. Sannikov S., Kuyukov S., Zamyatin A., Zhigailov A. The appliance of prefabricated soil-cement slabs processed with a hydrophobizing material for the road construction. In: *MATEC Web of Conferences: XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering*. 2018;196:04026. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819604026>
3. Aimenov Zh. T., Aimenov A. Z., Erofeev V. T., Sabitov L. S., Sanyagina Ya. A. The effect of modifying additives on the performance properties of slag-alkali binders and concretes. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024;20(1):162–170. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-1-162-170>
4. Ryabchevsky I. S. Production of Cellular Concretes Using Fly Ash. In: *The 6th International Student Construction Forum – 2021. Vol. 2*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov; 2021. P. 175–178. (In Russ.)
5. Altynbekova A. D., Lukpanov R. E., Dyusseminov D. S., Tokanov D. T., Orazova D. K. Influence research of modified additives on concrete properties. *Trudy universiteta*. 2023;(4):188–194. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2023_4_188.
6. Utepov Ye. B., Akhmetov D. A., Akhmatshaeva I. T., Root Ye. N. Study of the influence of fine fillers from technogenic waste and chemical additives on the properties of self-compacting concrete. *Complex Use of Mineral Resources*. 2019;(4):64–73. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.39>.
7. Fediuk R. S., Stoyushko N. Yu., Gladkova N. A., Garmashov I. S., Batarshin V. O. Research on electrically conductive concrete. In: *The 3rd Interdisciplinary Youth Scientific Forum with International Participation "New Materials", Moscow, 21–24 November, 2017*. Moscow: Buki Vedi; 2017. P. 654–657. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34983326>.
8. Agunov A. V., Terekhin I. A., Baranov. I. A. Analysis of the application of electric conducting concrete in the power industry. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(2):5–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/transsyst2021725-15>
9. Ivanova T. A., Kolesnikova L. G., Petrova T. M. Electrically conductive concrete for sidewalks and pedestrian paths. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021;(6):96–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-6-96-104>
10. Shishkin N. O., Uglanova A. E., Zorina O. A. Application of conductive concrete in road surface lighting. In: *Youth to Earth sciences: Abstracts from the 10th International conference for young researchers. Moscow, 31 March – 01 April 2022. In seven volumes. Vol. 7*. Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 2022;7:280–283. (In Russ.)
11. Podiapol'skaya E. Yu., Dmitriev S. M., Dolzhenkov V. A. Electroconductive cement concrete composite development and its application in the road industry. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2020;(2):7. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43921411>.
12. Urkhanova L. A., Urkhanova A. A., Lkhasaranov S. A., Smirnyagina N. N. Study of the electrical conductivity of concrete. In: *Construction materials science: Present and future: Proceedings of the 1st all-Russian scientific conference in honor of the 90th anniversary of academician Yu. M. Bazhenov, Moscow, 01–02 October 2020*. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering; 2020. P. 279–281. (In Russ.)
13. Vasilyuk Yu. I. Development of composition and applications for conductive concrete. In: *Construction Series: A collection of articles by graduate and postgraduate students. In 2 volumes. Vol. 2. Issue 3*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2020. P. 247–256. (In Russ.)
14. Denisyuk I. Yu., Uspenskaya M. V., Fokina M. I., Logushkova K. Yu. Conductive concrete composition. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2018;18(1):158–162. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-1-158-162>
15. Ibragimova D. F. Investigation of concrete properties with the addition of technical carbon. *Molodoy ucheny*. 2023;(19):96–99. Available at: <https://moluch.ru/archive/466/102408/>.
16. Fanina E. A., Lopanov A. N. Electric conductivity and aggregation of anthracite and graphite particles in concretes. *Solid Fuel Chemistry*. 2009;43(1):38–42. <https://doi.org/10.3103/S0361521909010091>
17. Goisis M. Graphene: an opportunity for concrete. *Journal Cement and Its Applications*. 2020;(1):108–115. (In Russ.) Available at: <https://jcement.ru/magazine/vypusk-1-2020/grafen-novye-vozmozhnosti-dlya-betona/>.

18. Xie P., Gu P., Beaudoin J. J. Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres. *Journal of Materials Science*. 1996;31(15):4093–4097. <https://doi.org/10.1007/bf00352673>
19. Bai Y. H., Tu R., Chen W., Chen B. Research on electrically conductive concrete with double-layered stainless steel fibers for pavement deicing. *ACI Materials Journal*. 2017;114(6):935–943. <https://doi.org/10.14359/51700993>
20. Yoo D.-Y., You I., Lee S.-J. Electrical properties of cement-based composites with carbon nanotubes, graphene, and graphite nanofibers. *Sensors*. 2017;17(5):1064–1076. <https://doi.org/10.3390/s17051064>
21. Rahman Md. L., Malakooti A., Ceylan H., Kim S., Taylor P. C. Identifying the best mixing procedure practice for ready-mix concrete plant production of carbon fibre reinforced electrically conductive concrete. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023;24(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2225119>
22. Notani M. A., Arabzadeh A., Ceylan H., Gopalakrishnan K., Kim S. Effect of carbon-fiber properties on volumetrics and ohmic heating of electrically conductive asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2019;31(9):04019200. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002868](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002868)
23. Yehia Sh., Tuan C. Y. Thin conductive concrete overlay for bridge deck deicing and anti-icing. *Transportation Research Record*. 2000;1698(1):45–53. <https://doi.org/10.3141/1698-07>
24. Rybin P. K., Terekhin I. A., Baranov I. A. Methodology for the experimental evaluation of the conductive properties of concrete structures for sustainable transport development. *Transportation Research Procedia*. 2023;68:688–693. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.095>



Информация об авторах

Куюков Сергей Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, kujukovsa@tyuiu.ru
Третьяков Петр Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой физики и приборостроения, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, tretjakovpj@tyuiu.ru
Тестешев Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, testeshevaa@tyuiu.ru

Замятин Алексей Валерьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, zamjatinav@tyuiu.ru

Жигайлов Александр Александрович, старший преподаватель кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, zhigajlovaa@tyuiu.ru

Information about the authors

Sergey A. Kuyukov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Roads and Airfields, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, kujukovsa@tyuiu.ru

Peter U. Tretyakov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Department of Physics and Instrument Engineering, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, tretjakovpj@tyuiu.ru

Alexander A. Testeshev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Roads and Airfields, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, testeshevaa@tyuiu.ru

Alexey V. Zamyatin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Roads and Airfields, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, zamjatinav@tyuiu.ru

Alexander A. Zhigailov, Senior Lecturer in the Department of Roads and Airfields, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, zhigajlovaa@tyuiu.ru

Получена 25 сентября 2024 г., одобрена 30 октября 2024 г., принята к публикации 03 декабря 2024 г.
Received 25 September 2024, Approved 30 October 2024, Accepted for publication 03 December 2024