

УДК 691.32

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.55

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия

EDN ccskpt

DOI 10.62980/2076-0655-2024-213-225

ТОКОПРОВОДЯЩИЕ ЦЕМЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И УГЛЕРОДНОЙ ФИБРЫ

Ларсен О.А.¹, Бахрах А.М.¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

АННОТАЦИЯ

Представлен подход к получению токопроводящего бетона со свойством нагревания на основе портландцементного вяжущего и токопроводящих компонентов. Рассмотрено влияние содержания вводимых в бетонную смесь токопроводящих компонентов, представляющих собой технический углерод К-354 и П-803, графит, углеродную фибру на токопроводящие свойства. Изучено влияние присутствия в поровом пространстве бетона свободной воды на формирование токопроводящей структуры при содержании токопроводящих компонентов ниже порога протекания электрического тока. Показано влияние объемной концентрации токопроводящих компонентов на величину удельного электрического сопротивления и ее изменение в процессе твердения в возрасте от 3 до 56 суток. Получены составы композиционного токопроводящего материала на основе портландцемента, технического углерода и углеродной фибры, обладающие удельным электрическим сопротивлением от 1,12 до 0,26 Ом·м в возрасте 56 суток существенно не изменяющимися в процессе твердения и дальнейшего использования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *портландцемент, технический углерод, углеродная фибра, удельное электрическое сопротивление*

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ларсен О.А., Бахрах А.М. Токопроводящие цементные системы на основе технического углерода и углеродной фибры // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 213-224. DOI 10.62980/2076-0655-2024-213-225, EDN ccskpt

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN ccskpt

DOI 10.62980/2076-0655-2024-213-225

ELECTRICALLY CONDUCTIVE CEMENT SYSTEMS BASED ON CARBON BLACK AND CARBON FIBER

Larsen O.A.¹, Bakhrakh A.M.¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering

ABSTRACT

An approach to the production of conductive concrete with the heating property based on a Portland cement binder and conductive components is presented. The influence of the content of conductive components introduced into the concrete mixture, which are carbon black K-354 and P-803, graphite, carbon fiber on conductive properties, is considered. The influence of the presence of free water in the pore space of concrete on the formation of a conductive structure with the content of conductive components below the percolation threshold of electric current has been studied. The influence of the volume concentration of conductive components on the value of electrical resistivity and its change during the hardening process at the age of 3 to 56 days is shown. The compositions of a composite conductive material based on Portland cement, carbon black and carbon fiber with a specific electrical resistance from 1.12 to 0.26 Ohm·m at the age of 56 days are obtained, which do not change significantly during hardening and further use.

KEY WORDS: *Portland cement, carbon black, carbon fiber, electrical resistivity*

FOR CITATION: Larsen O.A., Bakhrakh A.M. Electrically conductive cement systems based on carbon black and carbon fiber // Technique and technology of silicates. – 2024. Vol. – 31, No3. – Pp. 213 – 224. DOI 10.62980/2076-0655-2024-213-225, EDN ccskpt

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы повышения безопасности при эксплуатации мостовых сооружений при пониженных температурах и устранения обледенения верхнего слоя покрытий достигается применением химических реагентов, укладыванием изоляционных материалов, а также укладкой нагревательных элементов между слоями покрытия. Указанные способы отличаются либо высокой стоимостью, сложностью устройства, негативным влиянием на окружающую среду, либо низкой технико-экономической эффективностью.

Наиболее перспективным направлением получения антиобледенительных материалов для покрытий мостов является разработка электропроводных бетонов на основе портландцементного вяжущего со свойствами нагревания, получение которых основано на использовании токопроводящих компонентов.

Получение токопроводящих композитов основано на введении токопроводящих дисперсных компонентов в минеральную или полимерную матрицу [1, 2, 3]. Ввиду своих особых свойств электропроводные материалы получили применение в различных отраслях промышленности [4, 5].

Полимерные токопроводящие композиты могут обладать удельным электрическим сопротивлением, достигая величины 10–6 Ом·м, что позволяет, в ряде случаев, заменить металлы [6, 7]. Подобные материалы могут обладать свойством саморегулирования – снижения проводимости при увеличении температуры [8].

В области полимерных токопроводящих композитов большое внимание уделяется влиянию токопроводящих дисперсных добавок на проводимость, а именно, вида аллотропной формы углерода [9, 10], дисперсности технического углерода [11], размерности и неоднородности частиц [12], пористости проводящей добавки и ее влияние на повышение проводимости [13, 14] или снижение за счет образования крупных агломератов добавки [15], морфологии первичных агрегатов углерода [16, 17] и увеличения проводимости за счет оптимизации структуры частиц [18].

Помимо технического углерода, используются и другие токопроводящие компоненты. В работе [19] получены саморегулируемые нагреватели с массовыми концентрациями углеродных нанотрубок (УНТ), вводимые в количестве 2,8%, 3,0%, 3,2%. В исследовании [20] показано повышение проводимости при увеличении содержания УНТ при массовой концентрации добавки 1, 3, 5 и 7%. В работе [21] рассматривается получение электропроводящего полимера, наполненного углеродным волокном УИС-АК-П.

В строительстве наибольший интерес представляют токопроводящие композиты на основе обычного портландцемента, представляющие собой токопроводящие бетоны – бетэлы [22]. Технология устройства таких бетонов, обладающих свойством резистивного нагрева, позволит избежать разрушения покрытий, подвергающихся влиянию хлорида натрия [22, 23], применяемого для удаления отложений в виде рыхлого снега, снежного наката и стекловидного льда [24].

Принцип получения цементных токопроводящих бетонов идентичен, рассмотренным ранее полимерным материалам, и основан на введении технического углерода [25,36], кокса [26], углеродной и металлической фибры [27], металлической стружки [28], углеродных нанотрубок

INTRODUCTION

The solution to the problem of increasing safety in the operation of bridge structures at low temperatures and eliminating icing of the upper coating layer is achieved by using chemical reagents, laying insulating materials, as well as laying heating elements between the coating layers. These methods differ either in high cost, complexity of the device, negative impact on the environment, or low technical and economic efficiency.

The most promising direction for obtaining anti-icing materials for bridge coatings is the development of electrically conductive concretes based on a Portland cement binder with heating properties, the production of which is based on the use of conductive components.

The production of conductive composites is based on the introduction of conductive dispersed components into a mineral or polymer matrix [1, 2, 3]. Due to their special properties, electrically conductive materials have been used in various industries [4, 5].

Polymer conductive composites can have a specific electrical resistance, reaching a value of 10⁻⁶ ohms·m, which allows, in some cases, to replace metals [6, 7]. Such materials may have the property of self-regulation - a decrease in conductivity with an increase in temperature [8].

In the field of polymer conductive composites, much attention is paid to the effect of conductive dispersed additives on conductivity, namely, the type of allotropic form of carbon [9, 10], the dispersion of carbon black [11], the dimension and heterogeneity of particles [12], the porosity of the conductive additive and its effect on increasing conductivity [13, 14] or reducing due to the formation of large agglomerates of the additive [15], the morphology of primary carbon aggregates [16, 17] and an increase in conductivity due to optimization of the particle structure [18].

In addition to carbon black, other conductive components are also used. In [19], self-regulating heaters with mass concentrations of carbon nanotubes (CNTs) were obtained, introduced in amounts of 2.8%, 3.0%, 3.2%. The study [20] showed an increase in conductivity with an increase in the CNT content at a mass concentration of 1, 3, 5 and 7% of the additive. In [21], the preparation of an electrically conductive polymer filled with carbon fiber UIS-AK-P. is considered.

In construction, conductive composites based on conventional Portland cement, which are conductive concrete – betels, are of the greatest interest [22]. The technology of the device of such concretes, which have the property of resistive heating, makes it possible to avoid the destruction of coatings exposed to the influence of sodium chloride [22, 23], used to remove deposits in the form of loose snow, snow rolling and vitreous ice [24].

The principle of producing cement conductive concretes is identical to the polymer materials previously considered, and is based on the introduction of carbon black [25,36], coke [26], carbon and metal fibers [27], metal chips [28], carbon nanotubes [29,30], graphite [31] and their combinations. The essential difference between cement-based and polymer-based composites is the

[29,30], графита [31] и их сочетаниям. Существенное отличие композитов на цементной основе от полимерной - сложность генезиса и развития структуры цементного камня, являющегося крайне многогранным процессом, определяющим склонность к фазовым превращениям и изменениям [32].

В работе [33] показано увеличение предела прочности на сжатие в возрасте 28 сут. с 51,1 до 55,0 МПа при содержании углеродных нанотрубок (УНТ) в количестве 0,1% от массы вяжущего. При этом удельное электрическое сопротивление составило 32000 Ом·м в возрасте 7 суток и 45000 Ом·м в возрасте 28 суток. При содержании УНТ в количестве 0,5% от массы вяжущего удельное электрическое сопротивление составило 30000 Ом·м и 34000 Ом·м в возрасте 7 и 28 суток соответственно. Введение же 20% технического углерода и графита обеспечило получение удельного электрического сопротивления композиции, равного 51000 Ом·м и 89000 Ом·м в возрасте 7 суток соответственно, что соответствовало таким же показателям составов, содержащих УНТ.

В работе [34] представлены результаты испытаний составов с содержанием 0,2-0,4% углеродной фибры и 0,4-1,15% технического углерода по объему смеси на основе цемента, микрокремнезема, пластификатора, изготовленных при водоцементном отношении 0,25-0,34. Минимальное полученное значение удельного электрического сопротивления составило 0,97 Ом·м. Максимальная достигнутая температура поверхности образца при резистивном нагреве при приложении напряжения 20В составила 77 °С. Отмечено, что до 14 суток нормального твердения удельное электрическое сопротивление образцов постепенно увеличивалось, однако с 14 до 20 суток практически не изменялось, после чего были проведены испытания. Отмечено, что увеличение количества технического углерода приводило к большему снижению прочности, чем углеродная фибра за счет его высокой водопотребности. Вместе с тем, несмотря на высокую водопотребность, предел прочности при сжатии составил не менее 44 МПа для всех составов.

В диссертации Пулатова А.А. [35] разработаны составы мелкозернистого бетона марок М300-М800 с расходом технического углерода ТУ П-803 506-285кг/м³ при содержании цемента 337-630 кг/м³ и песка 843-915 кг/м³ соответственно. Предложено осуществлять улучшение свойств за счет совместной механохимической активации технического углерода, цемента и сухого пластификатора С-3 в шаровой мельнице. Полученные составы токопроводящего бетона имели удельное электрическое сопротивление до 1 Ом·м.

Цель исследования: получение композиционного токопроводящего материала на основе портландцемента, технического углерода и углеродной фибры, обладающего удельным электрическим сопротивлением, не изменяющимся в процессе твердения и последующем использовании.

Материалы и методы исследования

В работе применялись следующие материалы:
- портландцемент ЦЕМ I 52,5Н АО «Хайдельбергцемент Рус» в соответствии с ГОСТ 31108-2020;
- песок кварцевый с модулем крупности $M_k = 2,43$ в соответствии с ГОСТ 8738-2014;

complexity of the genesis and development of the structure of cement stone, which is an extremely multifaceted process that determines the tendency to phase transformations and changes [32].

The work [33] showed an increase in the compressive strength at the age of 28 days from 51.1 to 55.0 MPa with a carbon nanotube (CNT) content of 0.1% by weight of the binder. At the same time, the electrical resistivity was 32,000 ohms · m at the age of 7 days and 45,000 ohms · m at the age of 28 days. With a CNT content of 0.5% by weight of the binder, the electrical resistivity was 30,000 ohms · m and 34,000 ohms · m at the age of 7 and 28 days, respectively. The introduction of 20% carbon black and graphite provided a specific electrical resistance of the composition equal to 51,000 ohms · m and 89,000 ohms · m at the age of 7 days, respectively, which corresponded to the same indicators of compositions containing CNTs.

The work [34] presents the test results of compositions containing 0.2-0.4% carbon fiber and 0.4-1.15% carbon black by volume of a mixture based on cement, silica, plasticizer, manufactured with a water-cement ratio of 0.25-0.34. The minimum obtained value of the electrical resistivity was 0.97 ohm · m. The maximum achieved surface temperature of the sample under resistive heating when applying a voltage of 20 V was 77 ° C. It was noted that up to 14 days of normal hardening, the electrical resistivity of the samples gradually increased, but from 14 to 20 days it practically did not change, after which tests were carried out. It was noted that an increase in the amount of carbon black led to a greater decrease in strength than carbon fiber due to its high water demand. At the same time, despite the high water demand, the compressive strength was at least 44 MPa for all compositions.

In the dissertation of Pulatov A.A. [35], compositions of fine-grained concrete grades M300-M800 with a carbon black consumption of TU P-803 506-285 kg/m³ with a cement content of 337-630 kg/m³ and sand 843-915 kg/m³, respectively, were developed. It is proposed to improve the properties due to the joint mechanochemical activation of carbon black, cement and dry plasticizer C-3 in a ball mill. The resulting compositions of conductive concrete had an electrical resistivity of up to 1 ohm · m.

The purpose of the study: obtaining of composite current-conducting material based on Portland cement, technical carbon and carbon fiber, possessing specific electrical resistance, which does not change in the process of hardening and subsequent use.

Materials and methods of research

The following materials were used in the work:
- Portland cement CEM I 52.5N JSC "Heidelbergcement Rus" in accordance with GOST 31108-2020;
- quartz sand with a grain size modulus $M_k = 2.43$ in accordance with GOST 8738-2014;

- суперпластификатор SikaViscoCrete E55 в соответствии с ГОСТ 24211-200;
- технический углерод марок П-803 и К-354 ГОСТ 7885-86;
- графит ЭУТ-2 ГОСТ 10274-79;
- углеродная фибра MonsterFiber в соответствии с ТУ 1916-067-38276489-2017;
- добавка, снижающая проницаемость раствора и бетона «Centrilit NC» ТУ 20.59.57-088-51552155-2018;
- минеральный модификатор бетона «Эмбелит» ГОСТ 24211-2008.

Измерение удельного электрического сопротивления осуществлялось с использованием лабораторного регулируемого источника постоянного тока QJ3003P.

Эксперименты и обсуждение результатов

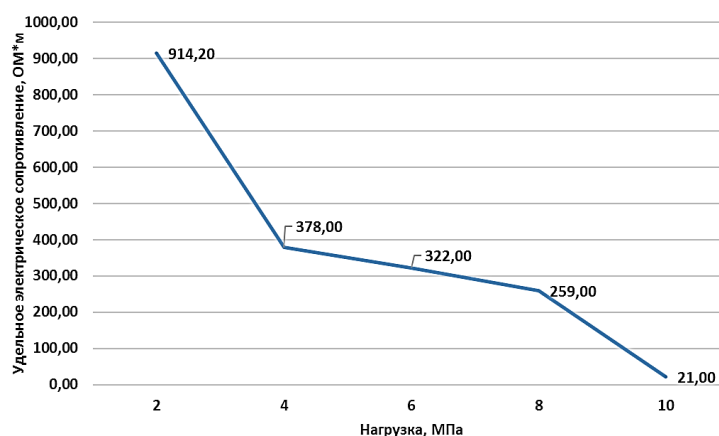
Измерения удельного электрического сопротивления с зажатием образцов-кубов размером 100x100x100 мм с содержанием 20% технического углерода ТУ К-354 между 2-х металлическими пластинами на гидравлическом прессе показали существенное влияние качества контакта между поверхностью куба и пластины. Увеличение усилия прижатия пластин в 4 раза (с 2 до 8 МПа) привело к снижению величины измеряемой характеристики в 3,5 с раза с 914,2 Ом·м до 259 Ом·м (рис. 1).

РИСУНОК 1

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАЗЦА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ УСИЛИЯ ПРИЖАТИЯ ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ

Figure 1

Measurement of the resistance of the sample with an increase in the pressure force of the electrodes



Применение различных токопроводящих смазок, нанесение на поверхности кубика порошка графита и технического углерода, а также шлифовка поверхности образцов-кубов не дали необходимого качества контакта между поверхностью куба и пластины, обеспечивающего повторяемость результатов измерений. По мнению авторов, наиболее предпочтительным способом измерения удельного электрического сопротивления токопроводящего бетона является погружение токопроводящих пластин в образец после формования, обеспечивая таким образом постоянный контакт электродов и повторяемость измерений.

При увеличении усилия прижатия электродов с 8 до 10 МПа произошло разрушение образца (рис. 1, 2). При этом было зафиксировано снижение величины сопротивления в 12,3 раз (с 259 Ом·м до 21 Ом·м). Данный эффект объясняется образованием при разрушении образца-куба дополнительных токопроводящих цепочек за счет обеспечения более плотного контакта между токопроводящими частицами.)

- superplasticizer Sika ViscoCrete E55 in accordance with GOST 24211-200;
- carbon black P-803 and K-354 GOST 7885-86;
- graphite EUT-2 GOST 10274-79;
- MonsterFiber carbon fiber in accordance with TU 1916-067-38276489-2017;
- additive reducing the permeability of mortar and concrete "Centrilit NC" TU 20.59.57-088-51552155-2018;
- mineral concrete modifier "Embelite" GOST 24211-2008.

The electrical resistivity was measured using a laboratory controlled direct current source QJ3003P.

Experiments and discussion

Measurements of the electrical resistivity with clamping of cube samples with a size of 100x100x100 mm with a content of 20% carbon black TU K-354 between 2 metal plates on a hydraulic press showed a significant influence on the quality of contact between the surface of the cube and the plate. An increase in the pressure of the plates by 4 times (from 2 to 8 MPa) led to a 3.5-fold decrease in the measured characteristic value from 914.2 ohms·m to 259 ohms·m (Fig. 1).

The use of various conductive lubricants, the application of graphite powder and carbon black on the surface of the cube, as well as the grinding of the surface of the cube samples did not provide the necessary quality of contact between the surface of the cube and the plate, ensuring repeatability of measurement results. According to the authors, the most preferable way to measure the electrical resistivity of conductive concrete is to immerse the conductive plates in the sample after molding, thus ensuring constant electrode contact and repeatability of measurements.

With an increase in the pressing force of the electrodes from 8 to 10 MPa, the sample was destroyed (Fig. 1, 2). At the same time, a decrease in the resistance value by 12.3 times was recorded (from 259 ohms·m to 21 ohms·m). This effect is explained by the formation of additional conductive chains during the destruction of the cube sample due to the provision of tighter contact between conductive particles.)

РИСУНОК 2

РАЗРУШЕННЫЙ ОБРАЗЕЦ СО СНИЖЕННЫМ С 259 ОМ·М ДО 21 ОМ·М УДЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ



Figure 2

A destroyed sample with a reduced electrical resistivity from 259 ohms·m to 21 ohms·m

С учетом описанного эффекта, а также ранее проведенными исследованиями авторов [36], в которых составы с содержанием 40-60% технического углерода от массы всех дисперсных компонентов, имели высокую водопотребность, приводящую к снижению объемной концентрации токопроводящих компонентов, серьезному увеличению сопротивления образца в процессе твердения, его дальнейшему растрескиванию, вызванному усадочными явлениями цементного камня, принято решение, что для дальнейших испытаний необходимо использовать составы мелкозернистой бетонной смеси с соотношением кварцевый песок:портландцемент, равным 2:1. Введение токопроводящих компонентов в небольших количествах не оказывает значительного влияния на водопотребность смеси, способствует получения плотной структуры цементного камня, снижает усадку и улучшает качество контакта между частицами токопроводящих компонентов. В качестве токопроводящих компонентов выступали технический углерод двух марок - П-803 и К-354, графит ЭУТ-2 и углеродная фибра, а также их сочетания: которые представлены в табл. 1.

Taking into account the described effect, as well as previous studies by the authors, in which formulations containing 40-60% carbon black from the mass of all dispersed components had a high water demand, leading to a decrease in the volume concentration of conductive components, a serious increase in the resistance of the sample during hardening, its further cracking caused by shrinkage phenomena of cement stone, it was decided, that for further testing it is necessary to use compositions of fine-grained concrete mix with a quartz sand ratio:portland cement, equal to 2:1. The introduction of conductive components in small quantities does not significantly affect the water demand of the mixture, contributes to the formation of a dense cement stone structure, reduces shrinkage and improves the quality of contact between particles of conductive components. The conductive components were carbon black of two grades - P-803 and K-354, graphite EUT-2 and carbon fiber, as well as their combinations: which are presented in Table 1.

ТАБЛИЦА 1. КОЛИЧЕСТВО ВВОДИМЫХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КОМПОНЕНТОВ
Table 1. The number of conductive components to be introduced

№ состава Mix Design №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
К-354, % от Ц K-354, % by the mass of cement	1	2,5	5	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	1	-	-
П-803, % от Ц P-803, % by the mass of cement	-	-	-	5	10	15	-	-	-	5	-	5	-	-	-	-	5	-
ЭУТ-2, % от Ц EUT-2, % by the mass of cement	-	-	-	-	-	-	3	7	13	-	3	3	-	-	-	-	-	3
Угл. фибра, % от Ц Carbon fiber, % by the mass of cement	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5

Результаты испытаний показали, что удельное электрическое сопротивление образцов с различными токопроводящими компонентами в возрасте 28 суток твердения в нормальных условиях находилось в широких пределах - от 141,4 до 43,28 Ом·м. Удельное электрическое сопротивление контрольного состава составило 303 Ом·м. Также было установлено, что в возрасте более 100 сут все образцы перестали проводить электрический ток (рис. 3).

The test results showed that the electrical resistivity of samples with various conductive components at the age of 28 days of hardening under normal conditions was in wide ranges - from 141.4 to 43.28 ohms ·m. The electrical resistivity of the control composition was 303 ohms ·m. It was also found that at the age of more than 100 days, all samples stopped conducting electric current (Fig. 3).

РИСУНОК 3

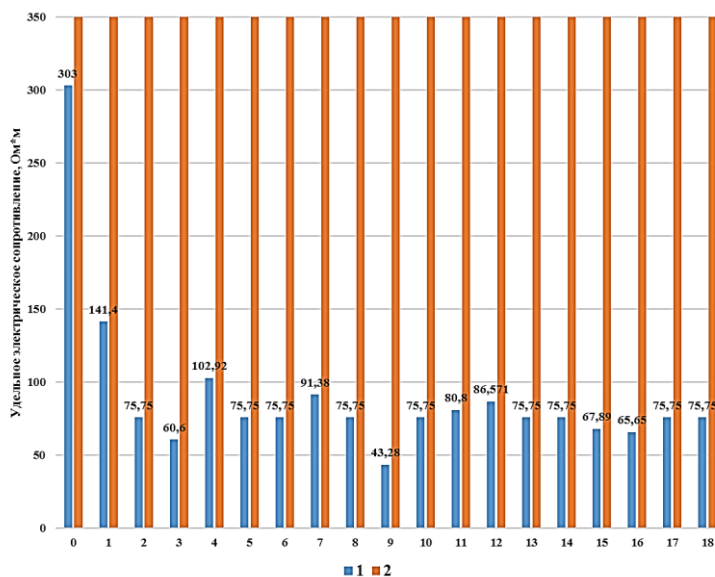
ЗНАЧЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СОСТАВОВ №1-18 В ВОЗРАСТЕ 28 И БОЛЕЕ 100 СУТОК ТВЕРДЕНИЯ:

1 – 28 суток твердения
2 – более 100 суток твердения

Figure 3

The values of the electrical resistivity of compositions No. 1-18 at the age of 28 and more than 100 days of hardening:

1 – 28 days of hardening
2 – more than 100 days of hardening



На основании полученных результатов и для оценки влияния усадки на снижение проводимости были проведены испытания образцов, содержащих 3% ТУ К-354, 3% П-803 и 3% углеродной фибры от массы цемента и заменой 7-25% цемента добавками-модификаторами структуры бетона Эмбелит 2-100С и Centrilit NC (табл. 2), снижающих усадку цементного камня.

Based on the results obtained and to assess the effect of shrinkage on reduced conductivity, samples containing 3% TU K-354, 3% P-803 and 3% carbon fiber by weight of cement were tested and 7-25% cement was replaced with additives modifiers of concrete structure Embelite 2-100C and Centrilit NC (Table. 2), reducing the shrinkage of the cement stone.

ТАБЛИЦА 2 КОЛИЧЕСТВО ВВОДИМЫХ ДОБАВОК-МОДИФИКАТОРОВ
Table 2 The number of modifier additives introduced

№ состава Composition No.	19	20	21	22	23	24
Угл. фибра, % от Ц Carbon fiber, % by the mass of cement	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
К-354, % от Ц K-354, % by the mass of cement	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
П-803, % от Ц P-803, % by the mass of cement	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Эмбелит 2-100С, % от Ц Embelite 2-100C, % by the mass of cement	7,0	15,0	25,0	-	-	-
Centrilit NC, % от Ц Centrilit NC, % by the mass of cement	-	-	-	7,0	15,0	25,0

Совместное введение ТУ П-803, К-354 и углеродной фибры в количестве 3% позволило снизить удельное электрическое сопротивление в возрасте 28 суток до величины 5,18-14,43 Ом·м. Было установлено отсутствие прямой зависимости изменения проводимости от количества добавок-модификаторов (рис. 4). Вместе с тем, после извлечения образцов из камеры нормального твердения в возрасте 28 суток показатели удельного электрического сопротивления стали повышаться, что можно объяснить испарением свободной воды из образцов. В возрасте более 100 суток образцы составов 19-24 перестали проводить электрический ток при подключаемом напряжении

The combined introduction of TU P-803, K-354 and carbon fiber in an amount of 3% made it possible to reduce the electrical resistivity at the age of 28 days to a value of 5.18-14.43 ohms ·m. It was found that there was no direct dependence of the change in conductivity on the amount of modifier additives (Fig. 4). At the same time, after the samples were extracted from the normal hardening chamber at the age of 28 days, the electrical resistivity indices began to increase, which can be explained by the evaporation of free water from the samples. At the age of more than 100 days, samples of compositions 19-24 stopped conducting electric current at the connected voltage.

РИСУНОК 4

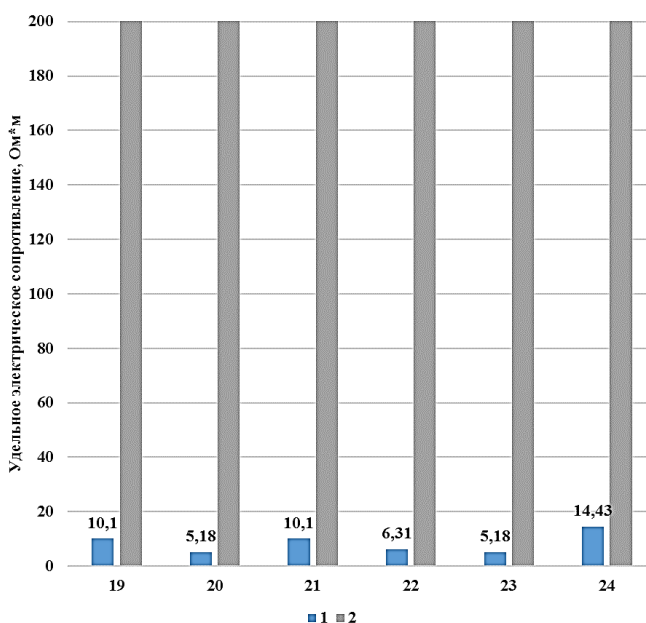
ЗНАЧЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СОСТАВОВ №19-24 В ВОЗРАСТЕ 28 И БОЛЕЕ 100 СУТ ТВЕРДЕНИЯ:

1 – 28 суток твердения
2 – более 100 суток твердения

Figure 4

Values of the electrical resistivity of compositions no. 19-24 at the age of 28 and more than 100 days of hardening:

1 – 28 days of hardening
2 – more than 100 days of hardening



На основании результатов испытаний составов №1-24 можно сделать вывод о том, что проводимость образцов в возрасте до 28 суток хранения в нормальных условиях обеспечивается за счет содержания свободной воды в образцах, которая совместно с частицами токопроводящих компонентов образует токопроводящие цепочки. Это можно объяснить тем, что при замораживании образцов при отрицательной температуре в течении суток происходит снижение проводимости и повышение удельного электрического сопротивления, что связано с отсутствием ионной проводимости льда и наличием проводимости воды. С учетом полученных результатов и положений теории перколяции можно сделать вывод о том, что введение токопроводящих компонентов в указанных количествах в составах №1-24 не обеспечивает получение перколяционного кластера после удаления свободной воды, даже при существенном снижении проводимости в раннем возрасте. Поэтому дальнейшие испытания проводились на составах без наполнителя, а суммарное количество токопроводящих компонентов в виде ТУ К-354, ТУ П-803 и углеродной фибры составило 14,4%, 18% и 22% от общего объема смеси. Удельное электрическое сопротивление в возрасте 3 сут составило для указанных объемных концентраций 0,82, 0,37 и 0,31 Ом·м соответственно. К 28 сут твердения необходимый показатель проводимости увеличился в 15,9, 5,97 и 2,6 раз соответственно (рис. 5). Таким образом, в системах на основе гидравлического вяжущего, объемная концентрация токопроводящих компонентов оказывает влияние не только на начальную электрическую проводимость, но и на конечную, что связано со структурой цементного камня и содержанием свободной воды, величина которой изменяется в процессе гидратации.

С учетом полученных результатов для дальнейших исследований в качестве эталонного был выбран состав с объемной концентрацией ТУ П-803 в количестве 25%, имеющего минимальную водопотребность, равную 80% от его массы, по сравнению с другими токопроводящими компонентами, используемыми в настоящей работе. Для повышения проводимости образцов проводилась замена ТУ П-803 на ТУ К-354 в количестве 5, 10, 15 и 20% от

Based on the test results of formulations No. 1-24, it can be concluded that the conductivity of samples under the age of 28 days of storage under normal conditions is ensured by the content of free water in the samples, which together with particles of conductive components forms conductive chains. This can be explained by the fact that when samples are frozen at a negative temperature during the day, there is a decrease in conductivity and an increase in electrical resistivity, which is due to the lack of ionic conductivity of ice and the presence of water conductivity. Taking into account the results obtained and the provisions of the percolation theory, it can be concluded that the introduction of conductive components in these quantities in formulations No. 1-24 does not ensure the production of a percolation cluster after removal of free water, even with a significant decrease in conductivity at an early age. Therefore, further tests were carried out on compositions without filler, and the total number of conductive components in the form of K-354, P-803 and carbon fiber amounted to 14.4%, 18% and 22% of the total volume of the mixture. The electrical resistivity at the age of 3 days was 0.82, 0.37 and 0.31 ohms·m, respectively, for these volume concentrations. By the 28th day of hardening, the required conductivity index increased by 15.9, 5.97 and 2.6 times, respectively (Fig. 5). Thus, in systems based on a hydraulic binder, the volume concentration of conductive components affects not only the initial electrical conductivity, but also the final one, which is associated with the structure of cement stone and the content of free water, the value of which changes during the hydration process.

Taking into account the results obtained, a composition with a volume concentration of TU P-803 in an amount of 25% was selected as a reference for further research, having a minimum water demand equal to 80% of its mass, compared with other conductive components used in this work. To increase the conductivity of the samples, TU P-803 was replaced with TU K-354 in the amount of 5, 10, 15 and 20% of the mass of TU P-803. It was noted that an increase in the content of TU K-354 in the composite by 4 times (from 5% to 20%) contributed to a decrease in electrical resistivity by 1.55 and 9.9 times at the age of 3 and 56 days, respectively.

массы ТУ П-803. Отмечено, что увеличение содержания ТУ К-354 в составе композита в 4 раза (с 5% до 20%) способствовало снижению удельного электрического сопротивления в 1,55 и 9,9 раза в возрасте 3 и 56 суток соответственно. Увеличение сопротивления в процессе твердения составило 12,4 и 1,95 раза для составов с 5 и 20% ТУ К-354 соответственно (рис. 6).

The increase in resistance during the hardening process was 12.4 and 1.95 times for compositions with 5 and 20% TU K-354, respectively (Fig. 6).

РИСУНОК 5

ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ:

1 – 3 сутки твердения
2 – 28 суток твердения

Figure 5

The effect of the volumetric concentration of conductive components on the electrical resistivity:

1-3 days of hardening
2 – 28 days of hardening

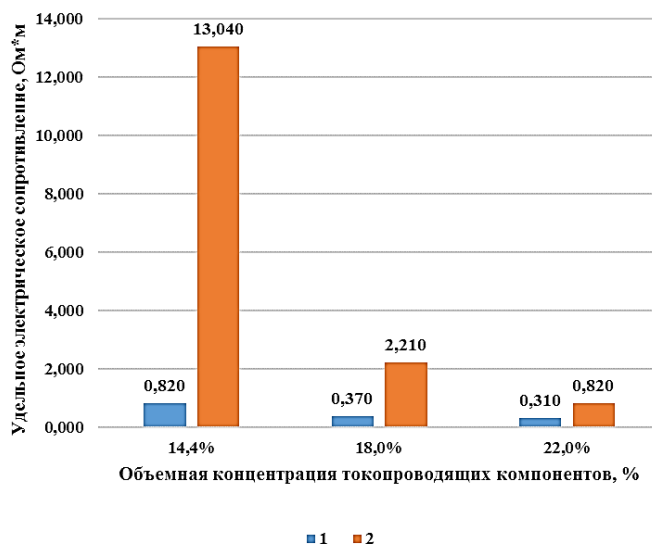


РИСУНОК 6

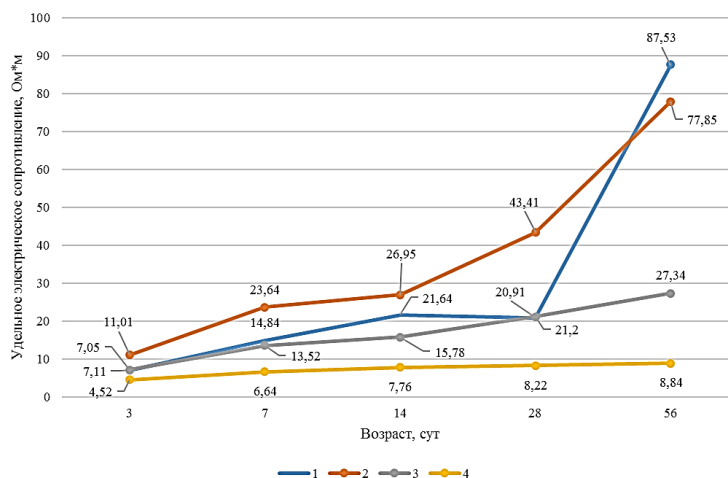
ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ТУ К-354 И П-803 НА УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ:

1 – 5% К-354; 2 – 5% К-354;
3 – 5% К-354; 4 – 5% К-354

Figure 6

Effect of TU K-354 and P-803 content on electrical resistivity:

1 – 5% К-354; 2 – 5% К-354;
3 – 5% К-354; 4 – 5% К-354



Для улучшения свойств электропроводности в состав композитов с объемной концентрацией ТУ П-803 в количестве 25% вводилась углеродная фибра в количестве 0,25, 0,5, 0,75 и 1% от массы цемента. Результаты эксперимента показали эффективность введения углеродной фибры с обратно-пропорциональной зависимостью снижения удельного электрического сопротивления. Введение углеродной фибры привело к снижению удельного электрического сопротивления в возрасте 3 сут до величины 0,85-0,34 Ом·м. Введение фибры также не способствовало сохранению величины удельного электрического сопротивления, которое в возрасте 56 сут в 10,5-82,3 раза, что значительно больше, чем в случае замены 10-20% ТУ П-803 на ТУ К-354 в аналогичном возрасте (рис. 7).

To improve the properties of electrical conductivity, carbon fiber in the amount of 0.25, 0.5, 0.75 and 1% of the cement weight was introduced into the composition of composites with a volume concentration of TU P-803 in an amount of 25%. The results of the experiment showed the effectiveness of the introduction of carbon fiber with an inversely proportional dependence of the decrease in electrical resistivity. The introduction of carbon fiber led to a decrease in the electrical resistivity at the age of 3 days to a value of 0.85-0.34 ohms · m. The introduction of fiber also did not contribute to the preservation of the value of electrical resistivity, which at the age of 56 days was 10.5-82.3 times, which is significantly more than in the case of replacing 10-20% of TU P-803 with TU K-354 in the same age (Fig. 7).

РИСУНОК 7

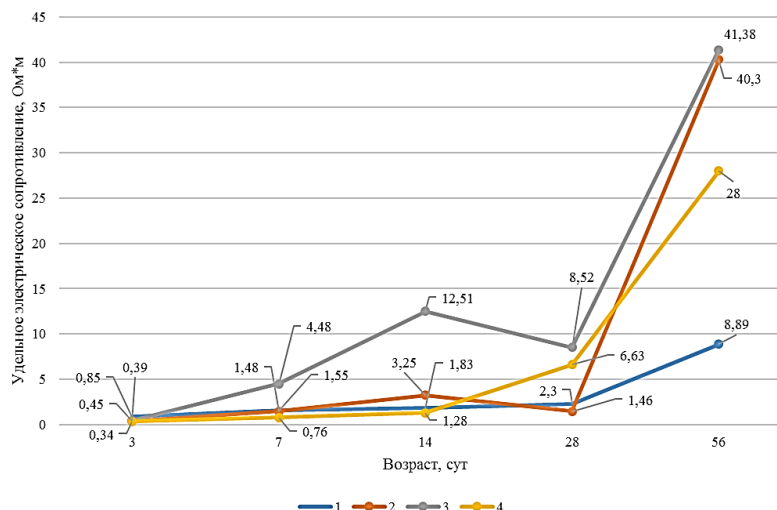
ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВВОДИМОЙ УГЛЕРОДНОЙ ФИБРЫ НА УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ:

- 1 – 0,25% углеродной фибры
 2 – 0,5% углеродной фибры
 3 – 0,75% углеродной фибры
 4 – 1% углеродной фибры

Figure 7

The effect of the amount of carbon fiber introduced on the electrical resistivity:

- 1 – 0,25% carbon fiber
 2 – 0,5% carbon fiber
 3 – 0,75% carbon fiber
 4 – 1% carbon fiber



Проведены испытания с применением одновременно углеродной фибры, существенно снижающей удельное электрическое сопротивление и повышающей физико-механические свойства бетона, и двух марок технического углерода, обеспечивающих совместно стабильность величины удельного электрического сопротивления при твердении и эксплуатации: ТУ К-354 в количестве 10,15 и 20% от массы ТУ П-803 и углеродной фибры в количестве 0,25, 0,5, 0,75 и 1% от массы цемента. Составы с 10% количеством ТУ К-354 показали отсутствие зависимости величины удельного электрического сопротивления от количества углеродной фибры: удельное электрическое сопротивление образцов в возрасте 56 суток составило 2,93, 10,85, 6,86 и 1,44 Ом·м для образцов с 0,25, 0,5, 0,75 и 1% углеродной фибры соответственно. Удельное электрическое сопротивление увеличилось в процессе твердения с 7 до 56 сут. в 4,24-18,1 раз. При количестве ТУ К-354 15 и 20% наблюдается обратная пропорциональная зависимость количества вводимой углеродной фибры и удельного электрического сопротивления (рис. 8). Получены составы с удельным электрическим сопротивлением 1,12-0,26 Ом·м, при этом изменение характеристики с 7 до 56 суток составило 1,06-1,04 раза.

Заключение

1. Установлено отсутствие постоянной электрической проводимости при введении в цементную систему технического углерода ТУ К-354, ТУ П-803, графита ЭУТ-2 и углеродной фибры в количестве 1-5%, 5-15%, 3-13% и 0,25-1% от массы цемента. Установлено влияние свободной воды на образование перколяционного кластера в цементных системах при введении токопроводящих компонентов при объемной концентрации токопроводящих компонентов ниже теоретического порога перколяции;

2. Установлено отсутствие взаимосвязи усадки цементной системы и повышения удельного электрического сопротивления токопроводящего бетона;

3. Показана невозможность регулирования токопроводящих свойств в цементных системах при введении токопроводящих компонентов в объемной концентрации ниже порога перколяции за счет введения добавок-

Tests were carried out using simultaneously carbon fiber, which significantly reduces the electrical resistivity and increases the physical and mechanical properties of concrete, and two grades of carbon black, which together ensure the stability of the electrical resistivity during hardening and operation: TU K-354 in the amount of 10.15 and 20% of the mass of TU P-803 and carbon fiber in the amount of 0.25, 0.5, 0.75 and 1% of the mass of cement. Compositions with 10% of the amount of TU K-354 showed no dependence of the magnitude of the electrical resistivity on the amount of carbon fiber: The electrical resistivity of the samples at the age of 56 days was 2.93, 10.85, 6.86 and 1.44 ohms·m for samples with 0.25, 0.5, 0.75 and 1% carbon fiber, respectively. The electrical resistivity increased during the hardening process from 7 to 56 days by 4.24-18.1 times. With an amount of TU K-354 of 15 and 20%, an inverse proportional dependence of the amount of carbon fiber introduced and the electrical resistivity is observed (Fig. 8). Compositions with an electrical resistivity of 1.12-0.26 ohms·m were obtained, while the change in characteristics from 7 to 56 days was 1.06-1.04 times.

Conclusions

1. The absence of constant electrical conductivity was established when technical carbon TU K-354, TU P-803, graphite EUT-2 and carbon fiber were introduced into the cement system in the amount of 1-5%, 5-15%, 3-13% and 0.25-1% by weight of cement. The effect of free water on the formation of a percolation cluster in cement systems with the introduction of conductive components at a volume concentration of conductive components below the theoretical percolation threshold has been established;

2. The absence of a relationship between shrinkage of the cement system and an increase in the electrical resistivity of conductive concrete has been established;

3. It is shown that it is impossible to regulate the conductive properties in cement systems when introducing conductive components in a volume concentration below the percolation threshold due to the introduction of additives-

модификаторов Эмбелит и Centrillit NC в количестве 7%, 15% и 25% взамен массы портландцемента;

modifiers Lambelite and Centrillit NC in the amount of 7%, 15% and 25% instead of the weight of Portland cement;

РИСУНОК 8

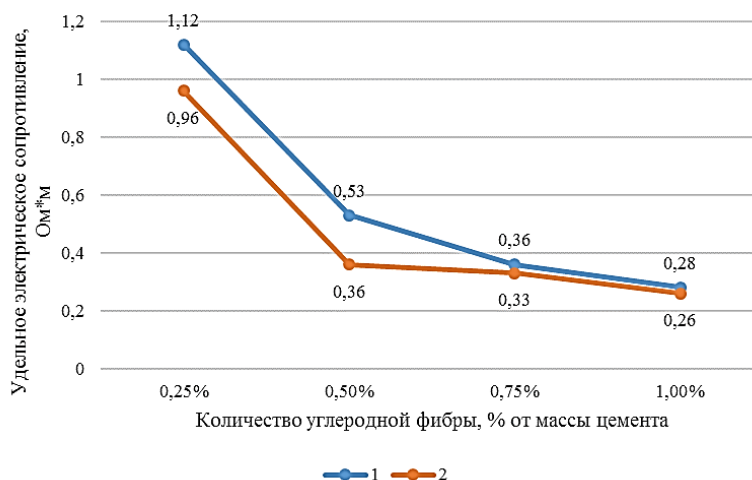
ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВВОДИМОЙ УГЛЕРОДНОЙ ФИБРЫ НА УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ ЗАМЕНЕ 15 И 20% ТУ П-803 НА ТУ К-354:

1 – 15% К-354
2 – 20% К-354

Figure 8

The effect of the amount of carbon fiber introduced on the electrical resistivity when replacing 15 and 20% of tu p-803 with tu k-354:

1 – 15% К-354
2 – 20% К-354



4. Установлено значительное снижение удельного электрического сопротивления в возрасте 3 суток с 0,82 Ом·м до 0,37 Ом·м при увеличении объемной концентрации токопроводящих компонентов с 14,4% до 18%. Показано снижение изменения удельного электрического сопротивления с 5,97 до 2,6 раз при увеличении объемной концентрации токопроводящих компонентов с 18% до 22% при снижении удельного электрического сопротивления с 0,37 до 0,31 Ом·м соответственно;

5. Получены токопроводящие цементные системы с введением 25% по объему технического углерода марок П-803 и К-354 в массовом соотношении 80:20-85:15 соответственно и углеродной фибры в количестве 0,25-1% от массы цемента. При этом удельное электрическое сопротивление полученного композиционного материала находится в диапазоне 1,12-0,26 Ом·м в возрасте 56 суток. В процессе твердения с 7 до 56 суток удельное электрическое сопротивление увеличивается в 1,06-1,04 раза и далее значительно не изменяется в процессе хранения и эксплуатации.

4. A significant decrease in electrical resistivity was found at the age of 3 days from 0.82 ohm · m to 0.37 Ohm · m with an increase in the volume concentration of conductive components from 14.4% to 18%. A decrease in the change in electrical resistivity from 5.97 to 2.6 times is shown with an increase in the volume concentration of conductive components from 18% to 22% with a decrease in electrical resistivity from 0.37 to 0.31 ohms · m, respectively;

5. Conductive cement systems were obtained with the introduction of 25% by volume of carbon black grades P-803 and K-354 in a mass ratio of 80:20-85:15, respectively, and carbon fiber in an amount of 0.25-1% by weight of cement. At the same time, the electrical resistivity of the resulting composite material is in the range of 1.12-0.26 ohms · m at the age of 56 days. During the hardening process, from 7 to 56 days, the electrical resistivity increases by 1.06-1.04 times and then does not change significantly during storage and operation.

Литература:

1. Гуль В.Е. Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. М.: Химия, 1984. 240 с.
2. Балкевич В.Л. Техническая керамика: Учебное пособие для вузов, 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.
3. Горелов В.П. Применение резин с электропроводящим углеродом ПМЭ-100В в электрообогреваемых панелях сельскохозяйственного назначения // Получение и свойства электропроводящего технического углерода. М., 1981. С. 12--123.
4. Новые материалы. / Под ред. Ю.С. Карабасова. М.: «МИСиС», 2002. 736 с.
5. Вороженцев Ю.И., Гольдаде В.А., Пинчук Л.С., Снежков В.В. Электрические и магнитные поля в технологии получения полимерных композитов / под ред. А.И. Свириденка. Минск: Наука і тэхніка, 1990. 26 с.
6. Электрические свойства полимеров / под ред. Б.И. Сажина: 3-е изд. Л., 1986. 224 с.
7. Wyzkiewicz I. et al. Self-regulation heater for microfluidic reactors // Sensor Actuat B-Chem. 2014. No. 1. Pp. 893-896. DOI: 10.1007/s11483-007-9043-6.

References:

1. Gul V.E. Shenfil L.Z. Electrically conductive polymer compositions. M.: Chemistry, 1984. 240 p. (in Russian)
2. Balkevich V.L. Technical ceramics: A textbook for universities, 2nd ed., reprint. and additional M.: Stroyizdat, 1984. 256 p. (in Russian)
3. Gorelov V.P. Application of rubbers with electrically conductive carbon PME-100V in electrically heated panels for agricultural purposes // Radiation and properties of electrically conductive technical carbon. M., 1981. pp. 12--123. (in Russian)
4. New materials. / Edited by Y.S. Karabasov. Moscow: MISiS, 2002. 736 p. (in Russian)
5. Voronezhstev Yu.I., Goldade V.A., Pinchuk L.S., Snezhkov V.V. Electric and magnetic fields in the technology of polymer composites production / ed. by A.I. Sviridenk. Minsk: Navuka i tehnika, 1990. 26 p. (in Russian)
6. Electrical properties of polymers / ed. by B.I. Sazhin: 3rd ed. L., 1986. 224 p. (in Russian)

8. Дувакина Н. И. Выбор наполнителей для придания специальных свойств полимерным материалам / Н. И. Дувакина, Н. И. Ткачева // Пластические массы. – 1989. № 11. С. 46 – 48.
9. Архипов Н. В. Электрические свойства порошков технического углерода / Н. В. Архипов, В. Н. Аникеев // Совершенствование технологии производства активных и среднеактивных марок технического углерода: сб. науч. тр. ВНИИТУ. М., 1986. С.143-147.
10. Эстрин Р. И. Объем и размеры пор в первичных агрегатах технического углерода как факторы, влияющие на электрические характеристики вулканизаторов / Р. И. Эстрин, Н. Я. Овсянников // Вестник МИТХТ. 2008. Т. 3. № 3. С. 1-7.
11. Sircar A. K. Effect of carbon-black particle-size distribution on electrical-conductivity / A. K. Sircar, T. G. Lamond // Rubber Chem. Technol. 1978. Vol. 51. P. 126.
12. Voet A. Investigation of carbon chains in rubber vulcanizates by means of dynamic electrical conductivity / A.Voet, F. R. Cook // Rubber Chem. Technol. 1968. Vol. 41. P. 1207.
13. Boonstra B. Performance of Carbon Blacks - Influence of Surface Roughness and Porosity / B. B. Boonstra, E. M. Dannenberg // Industrial and Engineering Chemistry. 1955. Vol. 47. P. 339.
14. Medalia A. I. Electrical conduction in carbon black composites / A. I. Medalia // Rubber Chemical Technology. 1986. Vol. 59. P. 432.
15. Verhelst W. F. The role of morphology and structure of carbon blacks in the electrical conductance of vulcanizates / W.F. Verhelst [et al.] // Rubber Chemical Technology. 1977. V. 50. P. 735.
16. Kraus G. Electrical Conductivity of Carbon Black-Reinforced Elastomers / G. Kraus, J. F.Svetlik // Journal of Electrochemical Society. 1956. V. 103. P. 337.
17. Киселева Е.А. Управление электросопротивлением резин путем регулирования дефектностью структуры дисперсного углерода / Е. А. Киселева Г. И. Раздьяконова // Динамика систем, механизмов и машин. 2012. № 3. С. 192-196.
18. Ягубов В.С., Щегольков А.В. Саморегулируемый электронагреватель на основе эластомера, модифицированный многослойными углеродными нанотрубками // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 3. С. 341–345.
19. Ягубов В.С., Щегольков А.В. Влияние различных типов углеродных нанотрубок и их концентраций на электрофизические параметры электронагревателей с саморегулированием температуры // Вестник ТГТУ. 2019. Т. 25. № 4. С. 678–689.
20. Абдуллин М.И., Глазырин А.Б, Басыров А.А., Гадеев А.С., Николаева А.А. Электропроводящие полимерные композиции на основе поливинилацетата // Пластические массы. 2018. № 1-2. С. 54-57.
21. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник для студентов высших учебных заведений / Ю.М. Баженов. М.: Издательство АСВ, 2011. 375с.
22. Терехин И.А., Кремлев И.А., Кондратьев Ю.В. и др. Модельное представление сухого бетона железобетонного фундамента контактной сети, как электрического проводника // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 3. – С. 88–92.
23. Титова Т.С., Сацук Т.П., Терехин И.А., Тарабин И.В. Оценка условий электробезопасности при применении опор контактной сети в качестве естественных заземлителей // Электротехника. – 2021. – № 2. – С. 7–11.
24. Федюк Р.С., Кузьмин Д.Е., Батаршин В.О., и др. Электропроводящие бетоны для специальных сооружений // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – 2017. – № 1. – С. 51–57.
25. Galao O., Banon L., Carmona J., Highly conductive carbon fiber reinforced concrete for icing prevention and curing. // Construction and building materials, № 52. pp. 137-145, 2016.
26. Gomis J., Galao O., Gomis V., Zornoza P., Self-heating and deicing conductive cement. // Construction building materials, № 75. pp. 442-449, 2015.
7. Wyzkiewicz I. et al. Self-regulating heater for microfluidic reactors // Sensor Actuat B-Chem. 2014. No. 1. Pp. 893-896. DOI: 10.1007/s11483-007-9043-6.
8. Duvakina N. I. The choice of fillers for imparting special properties to polymer materials / N. I. Duvakina, N. I. Tkacheva // Plastic masses. – 1989. № 11. pp. 46 – 48 (in Russian)
9. Arkhipov N. V. Electrical properties of carbon black powders / N. V. Arkhipov, V. N. Anikeev // Improving the technology of production of active and medium-active grades of technical carbon: collection of scientific tr. VNIITU. M., 1986. pp.143-147. (in Russian)
10. Estrin R. I. Volume and pore sizes in primary carbon black aggregates as factors affecting the electrical characteristics of vulcanizers / R. I. Estrin, N. Ya. Ovsyannikov // Vestnik MITKHT. 2008. Vol. 3. No. 3. pp. 1-7. (in Russian)
11. Sircar A. K. Effect of carbon-black particle-size distribution on electrical-conductivity / A. K. Sircar, T. G. Lamond // Rubber Chem. Technol. 1978. Vol. 51. P. 126.
12. Voet A. Investigation of carbon chains in rubber vulcanizates by means of dynamic electrical conductivity / A.Voet, F. R. Cook // Rubber Chem. Technol. 1968. Vol. 41. P. 1207.
13. Boonstra B. Performance of Carbon Blacks - Influence of Surface Roughness and Porosity / B. B. Boonstra, E. M. Dannenberg // Industrial and Engineering Chemistry. 1955. Vol. 47. P. 339.
14. Medalia A. I. Electrical conduction in carbon black composites / A. I. Medalia // Rubber Chemical Technology. 1986. Vol. 59. P. 432.
15. Verhelst W. F. The role of morphology and structure of carbon blacks in the electrical conductance of vulcanizates / W.F. Verhelst [et al.] // Rubber Chemical Technology. 1977. V. 50. P. 735.
16. Kraus G. Electrical Conductivity of Carbon Black-Reinforced Elastomers / G. Kraus, J. F.Svetlik // Journal of Electrochemical Society. 1956. V. 103. P. 337.
17. Kiseleva E.A. Control of electrical resistance of rubbers by regulating the defect structure of dispersed carbon / E. A. Kiseleva G. I. Razdiakonova // Dynamics of systems, mechanisms and machines. 2012. No. 3. pp. 192-196. (in Russian)
18. Yagubov V.S., Shchegolkov A.V. Self-regulating electric heater based on elastomer, modified with multilayer carbon nano-tubes // Vestnik VGUIT. 2018. Vol. 80. No. 3. pp. 341-345. (in Russian)
19. Yagubov V.S., Shchegolkov A.V. The influence of various types of carbon nanotubes and their concentrations on the electro-physical parameters of electric heating-bodies with self-regulation of temperature // Vestnik TSTU. 2019. Vol. 25. No. 4. pp. 678-689. (in Russian)
20. Abdullin M.I., Glazyrin A.B., Basyrov A.A., Ga-deev A.S., Nikolaeva A.A. Electrically conductive polymer compositions based on polyvinyl acetate // Plastic masses. 2018. No. 1-2. pp. 54-57. (in Russian)
21. Bazhenov Yu.M. Technology of concrete: textbook for students of higher educational institutions / Yu.M. Bazhenov. M.: Publishing House DIA, 2011. 375p. (in Russian)
22. Terexhin I.A., Kremlev I.A., Kondratiev Yu.V. et al. A model representation of dry concrete of a jelly-concrete foundation of a contact network as an electric conductor // Scientific problem of transport in Siberia and the Far East. - 2015. – No. 3. – pp. 88-92. (in Russian)
23. Titova T.S., Satsuk T.P., Terexhin I.A., Tarabin I.V. Assessment of electrical safety conditions when using contact network supports as natural earthing devices // Electrical engineering. – 2021. – No. 2. – pp. 7-11. (in Russian)
24. Fedyuk R.S., Kuzmin D.E., Batarshin V.O., etc. Electrically conductive concretes for special structures // Safety of the Construction Fund of Russia. Problems and solutions. - 2017. – No. 1. – pp. 51-57. (in Russian)
25. Galao O., Banon L., Carmona J., Highly conductive carbon fiber reinforced concrete for icing prevention and curing. // Construction and building materials, № 52. pp. 137-145, 2016.

27. Yu X., Kwon E., Carbon Nanotube Based Self-sensing Concrete for Pavement Structural Health Monitoring, // Cement and concrete composites, № 54. pp. 110-116, 2014.
28. Sircar A. K. Effect of carbon-black particle-size distribution on electrical-conductivity / A. K. Sircar, T. G. Lamond // Rubber Chem. Technol. 1978. Vol. 51. P. 126.
29. Voet A. Investigation of carbon chains in rubber vulcanizates by means of dynamic electrical conductivity / A. Voet, F. R. Cook // Rubber Chem. Technol. 1968. Vol. 41. P. 1207.
30. Boonstra B. Performance of Carbon Blacks - Influence of Surface Roughness and Porosity / B. B. Boonstra, E. M. Dannenberg // Industrial and Engineering Chemistry. 1955. Vol. 47. P. 339.
31. Medalia A. I. Electrical conduction in carbon black composites / A. I. Medalia // Rubber Chemical Technology. 1986. Vol. 59. P. 432.
32. Самченко, С. В. Формирование и генезис структуры цементного камня / С. В. Самченко. – 2-е издание. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – 288 с. – ISBN 978-5-7264-2808-6. – EDN KCBIBU.
33. Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Urkhanova A.A., Lkhasararov S.A., Ardashova G.R., Fediuk R.S., Svintsov A.P., Ivanov I.A. Mechanical and electrical properties of concrete modified by carbon nanoparticles // Magazine of Civil Engineering. 2019. №8 (92).
34. Seongwoo Gwon, Hyunjun Kim, Myoungsu Shin, Self-heating characteristics of electrically conductive cement composites with carbon black and carbon fiber, Cement and Concrete Composites, Volume 137, 2023, 104942, ISSN 0958-9465.
35. Пулатов А.А., Бетон электропроводный пластического формирования на электрокомпозиционном вяжущем. / А.А. Пулатов. — Москва: МГСУ, 1995. — 150с.
36. Ларсен О.А., Бахрах А.М. Композиционное вяжущее для токопроводящего бетона //Техника и технология силикатов. 2021. Т. 28. №3. С. 127 – 131.
26. Gomis J., Galao O., Gomis V., Zornoza P., Self-heating and deicing conductive cement. // Construction building materials, № 75. pp. 442-449, 2015.
27. Yu X., Kwon E., Carbon Nanotube Based Self-sensing Concrete for Pavement Structural Health Monitoring, // Cement and concrete composites, № 54. pp. 110-116, 2014.
28. Sircar A. K. Effect of carbon-black particle-size distribution on electrical-conductivity / A. K. Sircar, T. G. Lamond // Rubber Chem. Technol. 1978. Vol. 51. P. 126.
29. Voet A. Investigation of carbon chains in rubber vulcanizates by means of dynamic electrical conductivity / A. Voet, F. R. Cook // Rubber Chem. Technol. 1968. Vol. 41. P. 1207.
30. Boonstra B. Performance of Carbon Blacks - Influence of Surface Roughness and Porosity / B. B. Boonstra, E. M. Dannenberg // Industrial and Engineering Chemistry. 1955. Vol. 47. P. 339.
31. Medalia A. I. Electrical conduction in carbon black composites / A. I. Medalia // Rubber Chemical Technology. 1986. Vol. 59. P. 432.
32. Samchenko, S. V. Formation and genesis of the cement stone structure / S. V. Samchenko. – 2nd edition. – Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2020. – 288 p. – ISBN 978-5-7264-2808-6. – EDN KCBIBU. (in Russian)
33. Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Urkhanova A.A., Lkhasararov S.A., Ardashova G.R., Fediuk R.S., Svintsov A.P., Ivanov I.A. mechanical and electrical properties of concrete modified by carbon nanoparticles // Magazine of Civil Engineering. 2019. №8 (92).
34. Seongwoo Gwon, Hyunjun Kim, Myoungsu Shin, Self-heating characteristics of electrically conductive cement composites with carbon black and carbon fiber, Cement and Concrete Composites, Volume 137, 2023, 104942, ISSN 0958-9465.
35. Pulatov A.A., Electrically conductive plastic molding concrete on an electro-composite binder. / A.A. Pulatov. — Moscow: MGSU, 1995. — 150p. (in Russian)
36. Larsen O.A., Bakhrah A.M. Composite binder for conductive concrete //Technique and technology of silicates. 2021. Vol. 28. No.3. pp. 127 – 131. (in Russian)

Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”. Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”

Ларсен Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: larsen.oksana@mail.ru

Бахрах Антон Михайлович – аспирант кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: bahrah@erkon-beton.ru (автор для связи)

Вклад авторов: Ларсен О.А. - идея, научное руководство, научное редактирование статьи; Бахрах А.М. – разработка методики, обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Larsen Oksana Alexandrovna – PhD., Associate Professor; Federal State Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering",
E-mail: larsen.oksana@mail.ru

Bakhrah Anton Mikhailovich – postgraduate student of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering"
E-mail: bahrah@erkon-beton.ru (author for contact)

Contribution of the author: Larsen O.A.- idea, scientific guidance, scientific editing of the article; Bakhrah A.M. - development of methods, material processing, writing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.