

УДК 658.5:624.05

© Р. Х. Мухаметрахимов, канд. техн. наук, доцент

© А. М. Гарафиев, аспирант

(Казанский государственный

архитектурно-строительный университет,

Казань, Россия)

E-mail: muhametrahimov@mail.ru, garafiev93@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-4-54-67

© R. Kh. Mukhametrakhimov, PhD in Sci. Tech.,

Associate Professor

© A. M. Garafiev, post-graduate student

(Kazan State University of Architecture

and Engineering, Kazan, Russia)

E-mail: muhametrahimov@mail.ru, garafiev93@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ И ГРАДИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ШУНГИТСОДЕРЖАЩЕГО БЕТОНА, ПОДВЕРГАЕМОГО ЭЛЕКТРОДНОМУ ПРОГРЕВУ

INVESTIGATION OF HEAT FIELDS AND TEMPERATURE GRADIENTS ON THE SURFACE OF SHUNGITE CONTAINING CONCRETE UNDER ELECTRODE HEATING

В статье изучены тепловые поля и градиенты температур на поверхности шунгитсодержащего бетона, подвергаемого электродному прогреву при зимнем бетонировании. Установлена возможность повышения эффективности электродного прогрева при зимнем бетонировании и достижения более однородной температуры во всем объеме бетонной конструкции, препятствующей снижению качества за счет введения в состав бетонной смеси молотого токопроводящего минерала шунгита, активной минеральной добавки (АМД) и пластифицирующей добавки (ПД). Практическое применение данного метода позволит увеличить продолжительность электродного прогрева бетона, сократить время набора критической прочности железобетонных конструкций и увеличить скорость строительства в целом.

Ключевые слова: бетон, шунгит, электродный прогрев, тепловые поля.

The article presents the results of the study of heat fields and temperature gradients on the surface of shungite containing concrete under electrode heating during cold water concreting. There has been established a possibility of increasing the efficiency of electrode heating during winter concreting and achieving a more uniform temperature in the entire volume of the concrete structure, which prevents a decrease in quality due to the introduction of a ground conductive mineral shungite, an active mineral additive (AMA) and a plasticizing additive (PA) into the concrete mixture. Practical application of this method helps to increase duration of concrete electrode heating, reduce time of ultimate strength development of reinforced concrete structures and accelerate construction process in general.

Keywords: concrete, shungite, electrode heating, heat fields.

Введение

В настоящее время, несмотря на экономический кризис, в стране сохраняются достаточно высокие темпы строительства зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения, значительная доля которых осуществляется по монолитной тех-

нологии. Высокий темп возведения зданий и сооружений вызывает необходимость осуществлять большие объемы бетонных работ в зимний период. При этом наиболее широкое применение находят прогревные методы (греющие провода и электродный прогрев), которые позволяют обеспечить набор кри-

тической прочности в широком диапазоне отрицательных температур. Наиболее эффективным в энергетическом отношении методом электротепловой обработки бетона является электродный прогрев, когда конструкция включается в электрическую цепь и разогревается электрическим током, протекающим в объеме бетона [1].

При тепловой обработке железобетонных конструкций в зимних условиях большое практическое значение имеет характер изменения температуры, а также разность температур в центре конструкции и на его поверхности. Например, существуют предельные значения скорости нагрева и охлаждения, превышение которых может привести к снижению качества готовых железобетонных конструкций из-за возникновения неравномерных тепловых полей в объеме материала [2, 3].

Исследованию температурной характеристики электротепловой обработки бетона посредством электродного прогрева посвящены работы С. В. Федосова, В. И. Бобылева, А. М. Соколова, А. М. Ибрагимова, С. Н. Анисимова и др. [4–7]. В работе [6] показано, что для получения бетона требуемого качества необходимо, чтобы в ходе тепловой обработки величина градиентов температуры в объеме материала не достигала области опасных значений, т. е. соблюдалось условие $\text{grad } T < \text{grad } T_{\text{пр}}^*$; также наличие теплоизоляции на поверхности объекта электротепловой обработки не только позволяет значительно снизить бесполезные потери энергии, но и является эффективным средством уменьшения градиентов температуры в объеме. В работе [5] применены численные методы моделирования железобетонных изделий, подвергнутых термической обработке воздействием электрического поля. Авторами установлено, что получение абсолютно однородного температурного поля в объеме материала при его электротермической обработке электродным методом является труднодостижимой целью, а правильной

и реальной постановкой задачи следует считать получение такой неоднородности, при которой температурные градиенты не превышают допустимых значений [5].

Для решения данной проблемы находят применение различные методы повышения эффективности электродного прогрева, которые основаны на введении токопроводящих частиц в сырьевые смеси (стальных фибр [8–10], минеральных углеродсодержащих частиц и др.).

Основные положения расчета и рационального использования различных способов электротермообработки бетона в сборных и монолитных конструкциях, а также требования к материалам для бетона, подвергаемого электротермообработке, приведены в руководстве от НИИЖБ¹.

В работе С. Г. Головнева, М. В. Молодцова, Б. А. Евсеева и С. Б. Коваля показано, что наличие стальных волокон значительно изменяет величину и характер изменения удельного электрического сопротивления, которое отличается более равномерным протеканием и значительно меньшим темпом его увеличения со временем по сравнению с исходным составом [11]. В работе [12] методом численного моделирования подтверждается повышение эффективности электродного прогрева бетона, дисперсно армированного стальными фибрами. В работе [13] показано, что моделирование температурных полей позволяет определить места тепловых потерь и обоснованно корректировать параметры прогрева для повышения эффективности прогрева бетона. При введении в смесь стальных волокон (от 0 до 4 %) значение удельной электрической проводимости сталефибробетона при равномерном распределении фибр увеличивается линейно [14]. Недостатками использования металлических волокон в качестве токопроводящих частиц являются сложность их равномерного

¹ Руководство по электротермообработке бетона (НИИЖБ). М.: Госстройиздат, 1974. 255 с.

распределения в объеме бетона и, соответственно, неоднородность перколяционного эффекта, а также относительно высокая стоимость. Другой способ придания электропроводящих свойств композитам основан на введении в его состав углеродсодержащих частиц [15–17]. Ряд исследований [18–24] свидетельствует о возможности применения углеродных нанотрубок для повышения электропроводящих свойств, однако высокая стоимость и сложность однородного распределения наночастиц в объеме композита значительно ограничивают области практического применения данного технологического решения. Аналогичные подходы к приданию токопроводящих свойств композитам наблюдаются в ряде работ, направленных на решение задачи подогрева дорожных покрытий критически важной инфраструктуры (аэропортов, зон с интенсивным движением людей и транспорта), где в качестве токопроводящих компонентов применяются углеродные частицы [25, 26], графитовые порошки [27], стальная, медная и латунная стружки [28, 29].

Более эффективным и применимым на практике способом повышения электропроводности бетона в технологии электродного прогрева, по нашему мнению, является введение в его смесь молотых ($S_{уд} = 100\text{--}500\text{ м}^2/\text{кг}$) углеродсодержащих частиц, например шунгита [30–32]. В ранее выполненных работах определены оптимальные степень помола ($S_{уд} = 400\text{ м}^2/\text{кг}$) и содержание шунгита (5 % от массы цемента), обеспечивающие перколяционный эффект при электродном прогреве [33].

Не снижая значимости рассмотренных выше работ, следует отметить, что особенности изменения температурных полей и градиента температуры в зависимости от электрического сопротивления бетонных смесей, модифицированных молотым шунгитом в сочетании с активной минеральной и пластифицирующей добавками, твердею-

щих при электродном прогреве в условиях отрицательной температуры наружного воздуха, являются малоизученными, что представляет значительный интерес для научного обоснования технологического решения по повышению эффективности электродного прогрева при зимнем бетонировании [31].

Цель настоящей работы — изучение особенности изменения температурных полей и градиента температуры в зависимости от электрического сопротивления бетонных смесей, модифицированных молотым шунгитом в сочетании с активной минеральной и пластифицирующей добавками, твердеющих при электродном прогреве в условиях отрицательной температуры наружного воздуха.

Задачи:

1. Установление закономерностей изменения электрического сопротивления бетонных смесей исходного и модифицированных составов в процессе электродного прогрева бетона при отрицательной температуре наружного воздуха.

2. Изучение зон распространения температурных полей при электродном прогреве исходного и модифицированного составов бетона.

3. Определение наиболее эффективного состава из числа рассматриваемых для электродного прогрева бетона при отрицательной температуре наружного воздуха.

Объект исследований — модифицированный шунгитсодержащий бетон, твердеющий при электродном прогреве.

Предмет исследований — закономерности пространственного распределения температурных полей в зависимости от изменения электрического сопротивления бетона.

Материалы и методы исследования

Основные положения расчета и рационального использования различных способов электротермообработки бетона в сборных и монолитных конструкциях, а также требования к материалам для бетона, под-

вергаемого электротермообработке, приведены в руководстве от НИИЖБ².

Для зимнего бетонирования рекомендуется применять портландцементы с содержанием трехкальциевого алюмината не более 10 %, пластифицированные, гидрофобные и сульфатостойкие портландцементы допускается применять после предварительной проверки нарастания их прочности при принятых режимах прогрева. Цемент и тонкомолотые добавки при приготовлении бетонной смеси используются без подогрева³.

В качестве исходных компонентов для изготовления бетона с проектным классом В30, твердеющего при электродном прогреве, были применены:

1) вяжущее — портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Сухоложскцемент», соответствующий ГОСТ 31108–2016, следующего вещественного и химического состава, %: SiO_2 — 21,0; Al_2O_3 — 4,8; Fe_2O_3 — 3,9; CaO — 61,7; MgO — 2,8; щелочи — 0,7; Cl — 0,012;

2) мелкий заполнитель — фракционированный кварцевый песок, модуль крупности $M_k = 1,5$, Камско-Устьинского месторождения (Республика Татарстан), удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736–2014;

3) крупный заполнитель — гранитный щебень фракции 5-20 сорта А, изготовленный по ТУ 5711-006-00186938–2017, производства АО «ЕВРАЗ Качканарский горнообогатительный комбинат»;

4) активная минеральная добавка (АМД) — метакраолин МКЖЛ производства ЗАО «Пласт Рифей» по ТУ 5729-097-12615988–2013 с удельной поверхностью 1357 м²/кг, полученный термической обработкой обогащенного краолина месторождения Журавлиный Лог (Челябинская область), следующего химического состава, %:

Al_2O_3 — 42,0; SiO_2 — 55,8; Fe_2O_3 — 0,7; TiO_2 — 0,4; K_2O — 0,9; Na_2O — 0,05; CaO — 0,15;

5) пластифицирующая добавка (ПД) — водный раствор поликарбоксилатного эфира Glenium Ace 430 производства ООО «BASF Строительные системы» плотностью при 20 °С 1,06 г/см³, pH = 4–7;

6) шунгит молотый Зажогинского месторождения (Республика Карелия), производства ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС «КАРБОН-ШУНГИТ» (г. Петрозаводск) ($S_{уд} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$), следующего химического состава, %: SiO_2 — 57,0; TiO_2 — 0,2; Al_2O_3 — 4,3; MgO — 1,2; CaO — 0,3; Na_2O — 0,2; K_2O — 1,5; S — 1,5; C — 28,0; H_2O крист. — 3,0;

7) вода водопроводная питьевая, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732–2011. Для исключения влияния водопотребности на электрическое сопротивление бетона количество воды затворения всех составов принято одинаковым.

Для проведения экспериментальных исследований изготовлены бетонные смеси следующих составов:

№ 1 — контрольный состав (ПЦ — 370 кг, мелкий заполнитель — 444 кг, крупный заполнитель — 1000 кг);

№ 2 — состав, модифицированный шунгитом в количестве 5 % от массы цемента;

№ 3 — состав, модифицированный метакраолином и ПД Glenium Ace 430, в количестве 10 и 1 % от массы цемента соответственно;

№ 4 — состав, модифицированный шунгитом, метакраолином и ПД Glenium Ace 430 в количестве 5, 10 и 1 % от массы цемента соответственно.

Твердение бетона в образцах с размерами 100×100×400 мм с модулем поверхности 4,5 происходило под воздействием электродного прогрева при отрицательной температуре наружного воздуха от –10 до –15 °С.

Тепловизионные съемки образцов, подвергаемых электродному прогреву при отрицательных температурах, осуществляли

² Руководство по электротермообработке бетона (НИИЖБ). М.: Госстройиздат, 1974. 255 с.

³ Руководство по производству бетонных и железобетонных работ в зимних условиях / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1967. 87 с.

на портативном компьютерном термографе (тепловизор-радиометр) IRTIS-2000 с использованием сканирующего устройства «ПОКАТ-400». Обработка результатов произведена на программном обеспечении IRPreview. Схема испытания приведена на рис. 1.

Измерение сопротивления, силы тока и напряжения в электрической цепи производилось с помощью мультиметра STAYER 45320-T. Зависимости электрического сопротивления прогреваемых образцов от времени приведены на рис. 2.

Температура бетона при электродном прогреве определялась с помощью беспроводных датчиков температуры измерительного комплекса ревизор «Термохрон DS 1921», погруженных в тело образцов.

После завершения электротермообработки бетонные призмы распиливались на кубы размерами 10×10×10 см, предел прочности при сжатии определяли согласно ГОСТ 10180–2012 на машине для испытания на сжатие ИП-1000.

Результаты

Методом определения сопротивления электрической цепи определены зависимости электрического сопротивления про-

греваемых образцов от времени, исходя из которых можно выделить три основных стадии изменения величины удельного электрического сопротивления бетона при электродном прогреве: понижение удельного сопротивления; постепенная стабилизация удельного сопротивления; прогрессирующее возрастание удельного сопротивления. Этим трем стадиям соответствуют следующие стадии формирования структуры бетона: растворение в воде минералов клинкера и насыщение жидкой фазы продуктами гидратации бетонной смеси; перенасыщение жидкой фазы, коллоидация и начало кристаллизации гидратных новообразований; формирование кристаллической матрицы, уплотнение структуры цементного камня и нарастание механической прочности бетона [34].

По результатам анализа полученных зависимостей электрического сопротивления бетона во времени (см. рис. 2) установлено, что электродный прогрев бетона исследуемых составов в первые 8–10 ч характеризуется плавным увеличением сопротивления электрической цепи всех образцов в равной степени, это обусловлено растворением в воде минералов клинкера и насыщением жидкой фазы продуктами гидратации бетонной смеси. Данное наблюдение подтверждается термограммой, где температурное поле образцов разных составов отличается несущественно (рис. 3).

В интервале от 8–10 до 22–24 ч электродного прогрева возникает относительная стабилизация роста сопротивления всех образцов. Изменение электрического сопротивления исходного состава (№ 1) в пределах от 0,31 до 0,39 кОм, состава № 2 — от 0,22 до 0,26 кОм, состава № 3 — от 0,31 до 0,35 кОм, состава № 4 — от 0,27 до 0,29 кОм, по нашему мнению, вероятно, связано с перенасыщением жидкой фазы, коллоидацией и началом кристаллизации гидратных новообразований.

Бетонная смесь, модифицированная АМД и ПД, имеет более длительный интервал

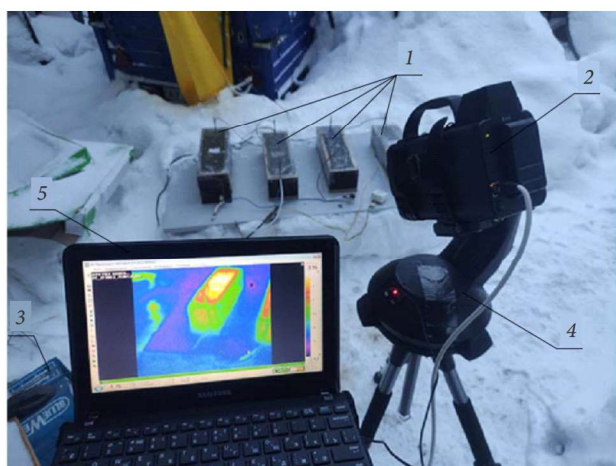


Рис. 1. Схема испытания: 1 — образцы бетона; 2 — тепловизор IRTIS-2000; 3 — трансформатор; 4 — сканирующее устройство «ПОКАТ-400»; 5 — ПК с программным обеспечением IRPreview

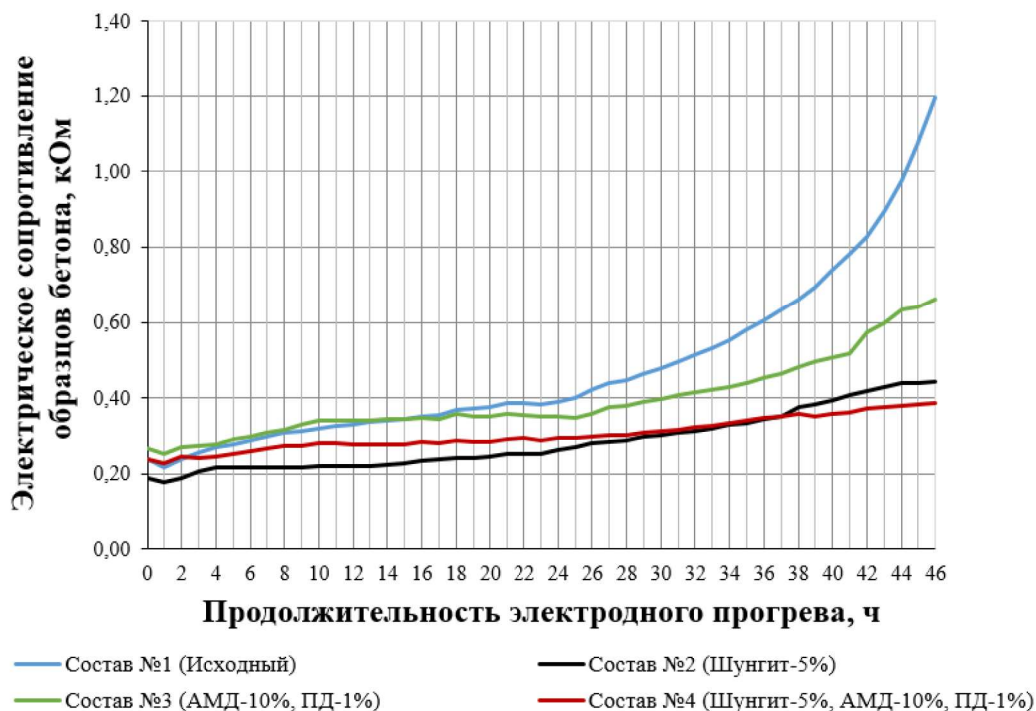


Рис. 2. Зависимости электрического сопротивления прогреваемых образцов от времени

плато — с 8 до 25 ч — по сравнению с исходным составом, что, по нашему мнению, связано с добавлением ПД Glenium Ace 430, которая способствует замедлению гидратации в начальный период времени и увеличению количества химически не связанной воды среди исследуемых составов при введении одинакового количества воды затворения в исследуемые составы.

Во временном периоде с 22–24 до 46 ч электродного прогрева наблюдается нарастающее увеличение электрического сопротивления всех исследуемых составов, но в разной степени. Наибольшим ростом отличается состав № 1 с максимальным значением электрического сопротивления 1,19 кОм. Электрическое сопротивление состава № 3 на 46-й час электродного прогрева на 44,6 % ниже, чем у исходного. Составы № 2 и 4, содержащие шунгит, отличаются значительно меньшим сопротивлением относительно исходного (на 62,9 и 67,6 % соответственно). Электрическое сопротивление состава № 1 изменяется в пределах от 0,39 до

1,19 кОм, состава № 2 — от 0,26 до 0,44 кОм, состава № 3 — от 0,35 до 0,66 кОм, состава № 4 — от 0,29 до 0,39 кОм, что связано с формированием кристаллической матрицы, уплотнением структуры цементного камня и нарастанием механической прочности бетона.

Для составов № 2 и 4 с шунгитом и модифицированных шунгитом, АМД и ПД в интервале с 22–24 до 46 ч электродного прогрева не наблюдается резкого увеличения электрического сопротивления, что связано с электропроводными свойствами минерала шунгита, испарением химически не связанной воды из тела бетона и участием ее в процессе гидратации.

С целью более точной фиксации особенностей распределения тепловых полей и градиентов температур на поверхности исследуемых образцов с помощью тепловизионного оборудования принято решение в рамках данного исследования отказаться от укрытия исследуемых образцов гидроизоляционными и теплоизоляционными мате-

риалами. При этом наблюдается снижение температуры прогреваемого бетона и его прочности по окончании электродного прогрева вследствие увеличения коэффициента теплопередачи у открытой поверхности всех образцов бетона, но в различной степени. Несмотря на это, твердение исследуемых образцов бетона осуществлялось при равных условиях, что позволяет выполнить анализ и оценку полученных результатов.

На рис. 3 и 4 приведены термограммы, отражающие тепловые потоки и градиенты температур на поверхности конструкций, подвергаемых электродному прогреву при зимнем бетонировании. Анализ данных, приведенных на рис. 3, свидетельствует об относительно равномерном распределении температурных полей и градиента температур при низком напряжении переменного тока после 3 ч прогрева всех исследуемых составов.

Как видно на рис. 4, для исходного состава (№ 1) и состава, модифицированного АМД и ПД (№ 3), дальнейший электродный прогрев (после 46 ч) невозможен из-за недостаточности электропроводных свойств бетона. Увеличение напряжения приводит к возрастанию затрат

электроэнергии и излишней концентрации температурных полей вокруг электродов.

Для учета особенностей тепловыделения бетона при его гидратации и вклада этого явления в температуру исследуемых образцов выполнены экспериментальные исследования. На рис. 5 приведены кривые тепловыделения контрольного состава и модифицированного молотым шунгитом.

Как видно на рис. 5, введение молотого шунгита не приводит к значимому изменению температуры, что подтверждает отсутствие его существенного влияния в исследуемых количествах на процессы тепловыделения при гидратации цемента в интервале 0–60 ч и свидетельствует об увеличении температуры бетонной смеси при электродном прогреве за счет токопроводящих свойств минерала.

Выполненные исследования показывают положительное влияние комплексного действия молотого шунгита, метаксаолина и пластифицирующей добавки на эффективность электродного прогрева бетона при зимнем бетонировании, что обусловлено снижением электрического сопротивления бетона по сравнению с другими применяемыми составами в начальный и последующий периоды

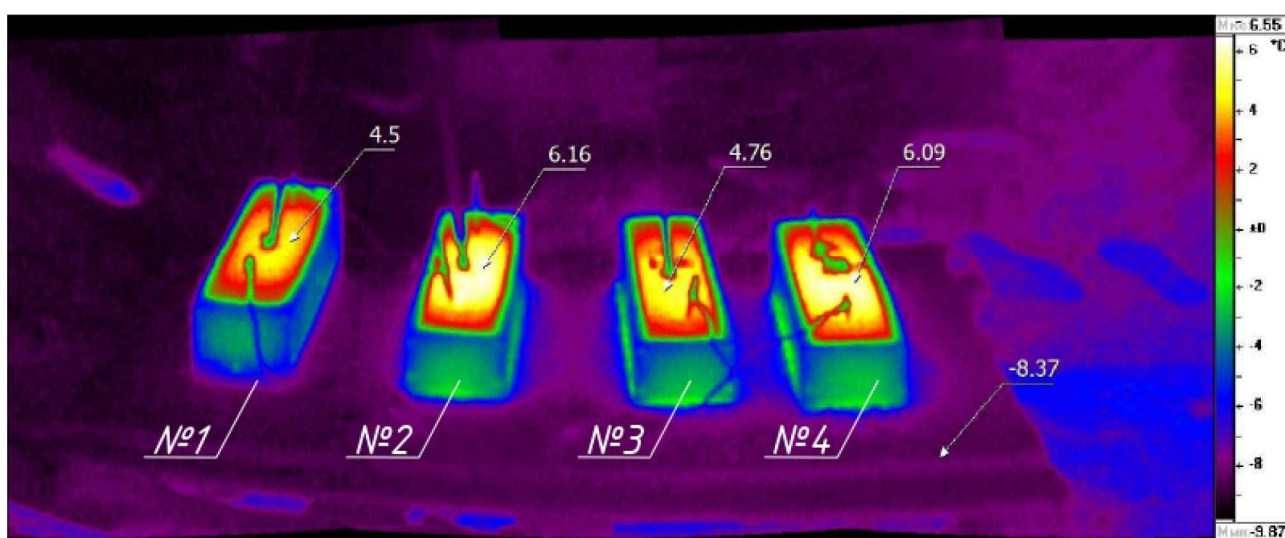


Рис. 3. Термограмма электродного прогрева бетона после 3 ч прогрева

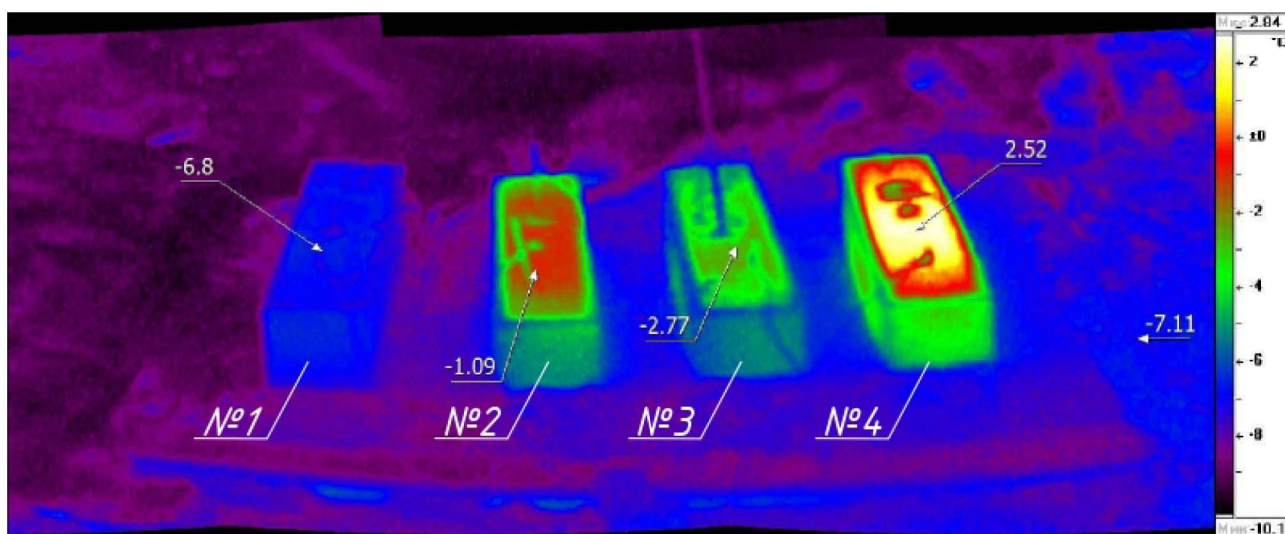


Рис. 4. Термограмма электродного прогрева бетона после 46 ч прогрева

электродного прогрева, что приводит к интенсификации процессов гидратации и возрастанию прочности шунгитосодержащего бетона [35, 36] и снижению концентрации температурных полей вокруг электродов.

Для изучения особенностей набора прочности бетона на сжатие выполнены испытания исследуемых образцов по окончании

их электродного прогрева, а также при нормальных условиях твердения (рис. 6).

Как видно из данных, приведенных на рис. 6, шунгит, обладающий гидравлической активностью и свойствами пуццолановой добавки в сочетании со способностью выступать в роли центров кристаллизации, вносит существенный вклад в повышение прочности

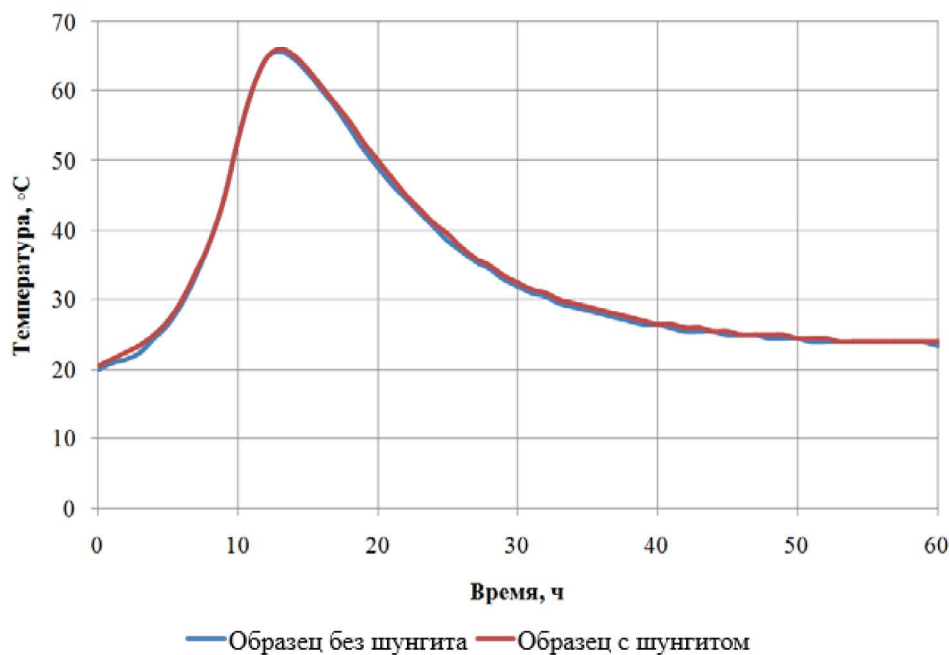


Рис. 5. Кинетика тепловыделения при гидратации вяжущего исходного состава и с введением шунгитового наполнителя в термосе при нормальных условиях

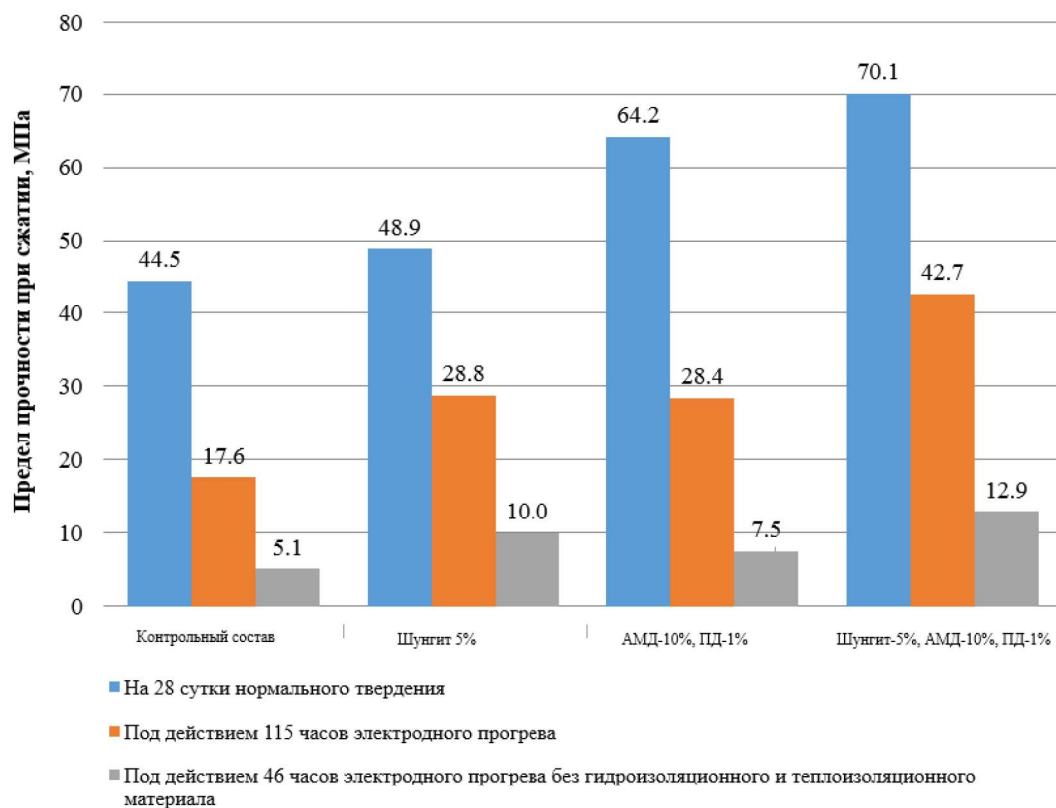


Рис. 6. Прочность исследуемых образцов бетона при различных условиях твердения

бетонов в условиях нормального твердения. Кроме того, его токопроводящие свойства позволяют в значительной степени увеличить эффективность электродного прогрева.

Установлено, что введение шунгита в количестве 5 % в исходный состав бетона позволяет увеличить его прочность при сжатии под действием электродного прогрева на 63,6 %. Введение 5 % шунгита в сочетании с АМД и ПД приводит к повышению прочности бетона при сжатии на 142,6 % по сравнению с исходным немодифицированным составом и на 50,3 % по сравнению с аналогичным составом без шунгита.

При электродном прогреве бетона без применения гидроизоляционных и теплоизоляционных материалов средняя прочность образцов бетона составов а) с введением шунгита, б) модифицированных АМД и ПД и в) модифицированных шунгитом, АМД и ПД выше на 49, 32 и 60,5 % соответ-

ственно по сравнению с контрольным образцом, что подтверждает положительное влияние молотого шунгита и комплексного действия молотого шунгита, метаксаолина и пластифицирующей добавки на эффективность электродного прогрева бетона при зимнем бетонировании.

Новизна работы — установлены особенности изменения температурных полей, градиента температуры, электрического сопротивления бетона и прочности в зависимости от их состава при электродном прогреве в условиях отрицательной температуры. Так, составы № 2, 3 и 4 отличаются меньшим сопротивлением на 46-й час прогрева на 62,9, 44,6 и 67,6 % соответственно, более высокой прочностью — на 49, 32 и 60,5 % соответственно и характеризуются более равномерным распределением температурных полей и градиента температуры относительно контрольного состава.

Практическая значимость исследований — разработаны рецептуры оптимальных составов бетонных смесей, подвергаемых электродному прогреву, характеризующихся повышенными физико-механическими свойствами и способностью более длительной электротермообработки без увеличения электрического напряжения, что способствует набору критической прочности, расширению области применения электродного прогрева и увеличению скорости строительства.

Выводы

1. Установлено существенное влияние молотого шунгита на изменение величины электрического сопротивления бетона при электродном прогреве. Составы бетона № 2, содержащие шунгит, и № 4, содержащие шунгит, АМД и ПД, отличаются значительно меньшим сопротивлением на третьей стадии ее изменения: на 62,9 и 67,6 % соответственно. Это свидетельствует об их более высокой эффективности при электродном прогреве и подтверждается прочностными характеристиками бетона, подвергнутого индукционному режиму электродного прогрева: прочность образцов бетона составов с введением шунгита, модифицированных АМД и ПД и модифицированных шунгитом, АМД и ПД, выше на 49, 32 и 60,5 % соответственно по сравнению с контрольным образцом, что подтверждает положительное влияние молотого шунгита и комплексного действия молотого шунгита, метакаолина и пластифицирующей добавки на эффективность электродного прогрева бетона при зимнем бетонировании.

2. Методом тепловизионной съемки определены тепловые потоки и градиенты температур на поверхности конструкций, подвергаемых электродному прогреву при зимнем бетонировании, которые свидетельствуют об относительно равномерном распределении температурных полей и градиента температур шунгитсодержащего бетона при низком напряжении переменного тока.

3. На основании выполненных исследований подтверждена эффективность электродного прогрева при зимнем бетонировании за счет достижения более однородной температуры во всем объеме бетонной конструкции, препятствующей снижению качества железобетонных конструкций за счет введения в состав бетонной смеси молотого шунгита, АМД и ПД. Практическое применение данного метода позволит увеличить продолжительность электродного прогрева бетона, тем самым снизив время набора критической прочности железобетонных конструкций, и увеличить скорость строительства в целом.

Библиографический список

1. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / под ред. Б. А. Крылова, С. А. Амбарцумяна, А. И. Звездова. М.: НИИЖБ, 2005. 276 с.
2. Федосов С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ПрессСто, 2010. 363 с.
3. Железобетонные и каменные конструкции / под ред. В. М. Бондаренко. М.: Высшая школа, 2007. 887 с.
4. Федосов С. В., Бобылев В. И., Ибрагимов А. М., Соколов А. М. Методика расчета предельных температурных градиентов в железобетонных изделиях в процессе электротепловой обработки // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 44–49.
5. Федосов С. В., Красносельских Н. В., Кузнецов А. Н., Соколов А. М. О возможности управления температурным полем в объеме вещества при его термической обработке воздействием электрического поля // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 4. С. 129–132.
6. Федосов С. В., Бобылев В. И., Соколов А. М. Температурные характеристики электротепловой обработки бетона посредством электродного прогрева // Строительные материалы. 2011. № 12. С. 56–59.
7. Федосов С. В., Соколов А. М., Анисимов С. Н. Температурное поле вдоль оси железобетонных колонн сборно-монолитных сооружений при наружном электропрогреве штепсельных соединений // Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 1. С. 57–69.
8. Ключев С. В. Высокопрочный сталефибробетон на техногенных песках КМА // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. № 11 (178). С. 38–39.

9. Ключев С. В. Фибробетон для каркасного строительства // Белгородская область: прошлое, настоящее, будущее: материалы областной науч.-практ. конф. В 3 частях. Белгород, 22 декабря 2011 года. Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2011. Т. 3. С. 37–38.
10. Klyuev S. V., Khezhev A. A., Pukharensko Yu. V., Klyuev A. V. The Fiber-Reinforced Concrete Constructions Experimental Research // Materials Science Forum. 2018. Vol. 931. Pp. 598–602.
11. Головнев С. Г., Евсеев Б. А., Коваль С. Б., Молодцов М. В. и др. Особенности электротермообработки монолитных конструкций из сталефибробетона. Южно-Ур. гос. ун-т, 1998. 8 с. / Деп. в ВИНТИ 15.04.98 № 1151 — В 98.
12. Матус Е. П. Численное моделирование электропрогрева дисперсно-армированного бетона с фибрами высокой проводимости // Вестник Евразийской науки. 2019. Т. 11, № 2. С. 1–9.
13. Dudin M. O., Vatin N. I., Barabanshchikov Yu. G. Modeling a set of concrete strength in the program ELCUT at warming of monolithic structures by wire // Magazine of Civil Engineering. 2015. Vol. 54, № 02. Pp. 33–45.
14. Armoosh S. R., Oltulu M. Effect of Different Micro Metal Powders on the Electrical Resistivity of Cementitious Composites // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 471, № 3. 032075.
15. Liu Y., Wang M., Tian W., Qi B., Lei Z., Wang W. Ohmic heating curing of carbon fiber/carbon nanofiber synergistically strengthening cement-based composites as repair/reinforcement materials used in ultra-low temperature environment // Composites Part A Applied Science and Manufacturing. 2019. Vol. 125. 105570.
16. Tian W., Liu Y., Wang M., Wang W. Performance and economic analyses of low-energy ohmic heating cured sustainable reactive powder concrete with dolomite powder as fine aggregates // Journal of Cleaner Production. 2021. № 329. 129692.
17. Gomis J., Galao O., Gomis V., Zornoza E., Garces P. A. Self-heating and deicing conductive cement. Experimental study and modeling // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 75. Pp. 442–449.
18. Cho S., Kruger J., Bester F., van den Heever M., van Rooyen A., van Zijl G. A Compendious Rheo-Mechanical Test for Printability Assessment of 3D Printable Concrete // RILEM Bookseries. 2020. Vol. 28. Pp. 196–205.
19. Khan M. S., Sanchez F., Zhou H. 3-D printing of concrete: Beyond horizons // Cement and Concrete Research. 2020. Vol. 133. 106070.
20. Куприянов В. Н. Анализ оптических свойств светопрозрачных ограждающих конструкций // Сб. науч. тр. РААСН. М.: АСВ, 2020. Т. 2. С. 332–339.
21. Janardhana M., Meher Prasad A., Menon D. Ductility of Glass Fibre Reinforced Gypsum Wall Panels Subjected to Cyclic (Reversed) Loading // 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete. 2008. Vol. 1. Pp. 803–812.
22. Бочаров Г. С., Елецкий А. В., Книжник А. А. Нелинейное сопротивление полимерных нанокомпозитов с присадкой углеродных нанотрубок в условиях перколяции // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 10. С. 64–68.
23. Семенов К. В., Барабанищikov Ю. Г. Термическая трещиностойкость массивных бетонных фундаментных плит и ее обеспечение в строительный период зимой // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 2 (17). С. 125–135.
24. Блохин А. Н. Влияние углеродных нанотрубок на электропроводность эпоксидной матрицы // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. 2012. № 3 (41). С. 384–386.
25. Sassani A., Arabzadeh A., Ceylan H., Kim S. Polyurethane-carbon microfiber composite coating for electrical heating of concrete pavement surfaces // Heliyon. 2019. Vol. 5, № 8. e02359.
26. Malakooti A., Theh W. S., Sadati S. M. S., Ceylan H., Kim S., Mina M., Cetin K., Taylor P. C. Design and Full-scale Implementation of the Largest Operational Electrically Conductive Concrete Heated Pavement System // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 255. 119229.
27. Fulham-Lebrasseur R., Sorelli L., Conciatori D. Prefabricated electrically conductive concrete (ECC) slabs with optimized electrode configuration and integrated sensor system // Cold Regions Science and Technology. 2022. Vol. 193. 103417.
28. Abolhasani A., Pachenari A., Razavian S. M., Abolhasani M. M. Towards new generation of electrode-free conductive cement composites utilizing nano carbon black // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 323 (6). 126576.
29. Malakooti A., Abdulla H., Sadati S. M. S., Ceylan H. Experimental and theoretical characterization of electrodes on electrical and thermal performance of electrically conductive concrete // Composites Part B Engineering. 2021. Vol. 222. 109003.
30. Пат. 2725715, Российская Федерация, МПК С04В 40/02, 111/20, 103/32, 14/36, 28/00. Способ зимнего бетонирования / Р. Х. Мухаметрахимов, А. Р. Галаутдинов, А. М. Гарафиев. № 2019143802, заявл. 23.12.2019, опубл. 03.07.2020.
31. Пат. 2750772, Российская Федерация, МПК С04В 40/02, 111/20, 103/32, 14/36, 28/00. Способ зимнего бетонирования строительных конструкций / Р. Х. Мухаметрахимов, А. Р. Галаутдинов, А. М. Гарафиев. № 2019143803, заявл. 23.12.2019, опубл. 02.07.2021.
32. Пат. 2750883, Российская Федерация, МПК С04В 40/02, 111/20, 103/32, 14/36, 28/00. Способ бетонирования при отрицательных температурах / Р. Х. Мух-

хаметрахимов, А. Р. Галаутдинов, А. М. Гарафиев. № 2019143804, заявл. 23.12.2019, опубл. 05.07.2021.

33. Гарафиев А. М., Мухаметрахимов Р. Х. Исследование перколяции электрического тока в среде модифицированных цементных композитов для энергосбережения в технологии электродного прогрева // Сб. материалов II Всерос. науч. конф., посвященной столетнему юбилею МИСИ — МГСУ «Строительное материаловедение: настоящее и будущее». Москва, 18–19 ноября 2021. М.: Изд-во МИСИ — МГСУ, 2021. С. 109–112.

34. Миронов С. А. Теория и методы зимнего бетонирования. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1975. 700 с.

35. Мухаметрахимов Р. Х., Галаутдинов А. Р., Гарафиев А. М. Электродный прогрев бетона с применением токопроводящего минерала // Известия Казанского гос. архит.-строит. ун-та. 2019. № 4 (50). С. 418–426.

36. Мухаметрахимов Р. Х., Галаутдинов А. Р., Потапова Л. И., Гарафиев А. М. Исследование структурообразования модифицированного шунгитсодержащего цементного камня методом ИК-спектроскопии // Известия Казанского гос. архит.-строит. ун-та. 2021. № 4 (58). С. 70–81.

References

1. *Rukovodstvo po progrevu betona v monolitnykh konstruktivnykh* [Guidelines for concrete heating in cast-in-situ structures]. Ed. by Krylov B. A., Ambartsumyan S. A., Zvezdov A. I. Moscow, NIIZhB Publ., 2005, 276 p.

2. Fedosov S. V. *Teplomassoperenos v tekhnologicheskikh protsessakh stroitel'noy industrii* [Heat and mass transfer in the technological processes of the construction industry]. Ivanovo, PressSto Publ., 2010, 363 p.

3. *Zhelezobetonnye i kamennye konstruksii* [Reinforced concrete and stone structure]. Ed. by Bondarenko V. M. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007, 887 p.

4. Fedosov S. V., Bobylev V. I., Ibragimov A. M., Sokolov A. M. *Metodika rascheta predel'nykh temperaturnykh gradientov v zhelezobetonnykh izdeliyakh v protsesse elektroteplovoy obrabotki* [Procedure for calculation of limit temperature gradients in reinforced concrete products during heat treatment]. *Stroitel'nye materialy – Construction materials*, 2011, no. 3, pp. 44–49.

5. Fedosov S. V., Krasnosel'skikh N. V., Kuznetsov A. N., Sokolov A. M. *O vozmozhnosti upravleniya temperaturnym polem v ob'eme veshchestva pri ego termicheskoy obrabotke vozdeystviem elektricheskogo polya* [On possibility of temperature field control in the substance volume during its thermal treatment by electric field effect]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo – Academia. Architecture and Construction*, 2015, no. 4, pp. 129–132. [].

6. Fedosov S. V., Bobylev V. I., Sokolov A. M. *Temperaturnye kharakteristiki elektroteplovoy obrabotki*

betona posredstvom elektrodnoy progrevy [Temperature characteristics of electric heat treatment of concrete by means of electrode heating]. *Stroitel'nye materialy – Construction materials*, 2011, no. 12, pp. 56–59.

7. Fedosov S. V., Sokolov A. M., Anisimov S. N. *Temperaturnoe pole vdol' osi zhelezobetonnykh kolonn sborno-monolitnykh sooruzheniy pri naruzhnom elektropogreve shtepsel'nykh soedineniy* [Temperature field along the axis of reinforced concrete columns of cast-in-situ structures at external electric heating of plug connections]. *Vestnik Povolzhskogo gos. tekhnol. un-ta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii – Bulletin of the Volga State Technol. un-ta. Series: Materials. Structures. Technology* – 2019, No. 1, pp. 57–69.

8. Klyuev S. V. *Vysokoprochniy stalefibrobeton na tekhnogennykh peskakh KMA* [High-strength steel fiber concrete on the KMA technogenic sands]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka – Construction materials, the equipment, technologies of the 21st century*, 2013, no. 11 (178), pp. 38–39.

9. Klyuev S. V. *Fibrobeton dlya karkasnogo stroitel'stva* [Fiber concrete for frame construction]. *Trudy oblastnoy nauch.-prakt. konf. v 3 chastyakh, Belgorod, 22 dekabrya 2011 goda. "Belgorodskaya oblast': proshloe, nastoyashchee, budushchee"* [Proceedings of the Belgorod regional sci.- pract. conference in 3 parts Belgorod, December 22, 2011 "Belgorod Region: the past. the present and the future"] Belgorod, 2011, BGUT of V.G. Shukhov Publ., vol. 3, pp. 37–38.

10. Klyuev S. V., Khezhev A. A., Pukharenskiy Yu. V., Klyuev A. V. The fiber-reinforced concrete constructions experimental research. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 931, p. 598–602.

11. Golovnev S. G., Evseev B. A., Koval' S. B., Molodtsov M. V., et al. *Osobennosti elektrotermoobrabotki monolitnykh konstruktivnykh izdeliy iz stalefibrobetona* [Features of electrical heat treatment of monolithic structures from steel fiber concrete]. *Yuzhno-Ur. gos. un-t Publ.*, 1998, 8 p. *VINITI* 15.04.98, vol. 98, no. 1151.

12. Matus E. P. *Chislennoe modelirovanie elektropogrevy dispersno-armirovannogo betona s fibrami vysokoy provodimosti* [Numerical modeling of electric heating of dispersed reinforced concrete with high-conductivity fibers]. *Vestnik Evraziyskoy nauki – Bulletin of Eurasian Science*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 1–9.

13. Dudin M. O., Vatin N. I., Barabanshchikov Yu. G. Modeling a set of concrete strength in the program ELCUT at warming of monolithic structures by wire. *Magazine of Civil Engineering*, 2015, vol. 54, no. 2, pp. 33–45.

14. Armoosh S. R., Oltulu M. Effect of different micro metal powders on the electrical resistivity of cementitious composites. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 471, no. 3. 032075.

15. Liu Y., Wang M., Tian W., Qi B., Lei Z., Wang W. Ohmic heating curing of carbon fiber/carbon nanofiber synergistically strengthening cement-based composites as repair/reinforcement materials used in ultra-low temperature environment. *Composites. Part A. Applied Science and Manufacturing*, 2019. vol. 125, 105570.
16. Tian W., Liu Y., Wang M., Wang W. Performance and economic analyses of low-energy ohmic heating cured sustainable reactive powder concrete with dolomite powder as fine aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 2021, no. 329, 129692.
17. Gomis J., Galao O., Gomis V., Zornoza E., Garces P. A. Self-heating and deicing conductive cement. Experimental study and modeling. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 75, pp. 442–449.
18. Cho S., Kruger J., Bester F., van den Heever M., van Rooyen A., van Zijl G. A compendious rheo-mechanical test for printability assessment of 3d printable concrete. *RILEM Bookseries*, 2020, vol. 28, pp. 196–205.
19. Khan M. S., Sanchez F., Zhou H. 3-D printing of concrete: Beyond horizons. *Cement and Concrete Research*, 2020, vol. 133, 106070.
20. Kupriyanov V. N. *Analiz opticheskikh svoystv svetoprozrachnykh ograzhdayushchikh konstruktiv* [Analysis of optical properties of translucent enclosing structures]. *Trudy RAASN – Proceedings of RAASN*, Moscow, ASV Publ., 2020, vol. 2, pp. 332–339.
21. Janardhana M., Meher Prasad A., Menon D. Ductility of Glass Fibre Reinforced Gypsum Wall Panels Subjected to Cyclic (Reversed) Loading. *Proceedings of the 7-th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete*, 2008, vol. 1, pp. 803–812.
22. Bocharov G. S., Eletskiy A. V., Knizhnik A. A. *Nelineynoe soprotivlenie polimernykh nanokompozitov s prisadkoy uglerodnykh nanotrubok v usloviyakh perkolyatsii* [Nonlinear resistance of polymer nanocomposites with carbon nanotube additive under percolation conditions]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 2016, vol. 86, no. 10, pp. 64–68.
23. Semenov K. V., Barabanshchikov Yu. G. *Termicheskaya treshchinostoykost' massivnykh betonnykh fundamentnykh plit i ee obespechenie v stroitel'niy period zimoy* [Thermal crack resistance of massive concrete foundation slabs and its provision during the construction period in winter]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of unique buildings and structures*, 2014, no. 2 (17), pp. 125–135.
24. Blokhin A. N. *Vliyaniye uglerodnykh nanotrubok na elektroprovodnost' epoksidnoy matritsy* [The influence of carbon nanotubes on the electrical conductivity of the epoxy matrix]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo – Issues of modern science and practice. University named after V. I. Vernadsky*, 2012, no. 3 (41), pp. 384–386.
25. Sassani A., Arabzadeh A., Ceylan H., Kim S. Polyurethane-carbon microfiber composite coating for electrical heating of concrete pavement surfaces. *Heliyon*, 2019, vol. 5, no. 8, e02359.
26. Malakooti A., et al. Design and full-scale implementation of the largest operational electrically conductive concrete heated pavement system. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 255, 119229.
27. Fulham-Lebrasseur R., Sorelli L., Conciatori D. Prefabricated electrically conductive concrete (ECC) slabs with optimized electrode configuration and integrated sensor system. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, vol. 193, 103417.
28. Abolhasani A., Pachenari A., Razavian S. M., Abolhasani M. M. Towards new generation of electrode-free conductive cement composites utilizing nano carbon black. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 323 (6), 126576.
29. Malakooti A., Abdulla H., Sadati S. M. S., Ceylan H. Experimental and theoretical characterization of electrodes on electrical and thermal performance of electrically conductive concrete. *Composites. Part B. Engineering*, 2021, vol. 222, 109003.
30. Mukhametrakhimov R. Kh., Galautdinov A. R., Garafiev A. M. *Sposob zimnego betonirovaniya* [Winter concreting method]. Patent RF, 2020, no. 2725715.
31. Mukhametrakhimov R. Kh., Galautdinov A. R., Garafiev A. M. *Sposob zimnego betonirovaniya stroitel'nykh konstruktiv* [Winter concreting method applied to construction structures]. Patent RF, 2021, no. 2750772.
32. Mukhametrakhimov R. Kh., Galautdinov A. R., Garafiev A. M. *Sposob betonirovaniya pri otritsatel'nykh temperaturakh* [Winter concreting method under below-freezing temperatures]. Patent RF, 2021, no. 2750883.
33. Garafiev A. M., Mukhametrakhimov R. Kh. *Issledovanie perkolyatsii elektricheskogo toka v srede modifitsirovannykh tsementnykh kompozitov dlya energosberezheniya v tekhnologii elektrodnoy progreva* [Research on percolation of electric current in the medium of modified cement composites for energy saving in electrode heating technology]. *Trudy II Vseros. nauch. konf., posvyashchennoy stoletnemu yubileyu MISI – MGSU «Stroitel'noe materialovedenie: nastoyashchee i budushchee»* [Proceedings of the II All-Russia sci. conf. dedicated to the centenary of the MISI - MGSU, Moscow, November 18-19, 2021 “Construction Materials Science: Present and Future”]. Moscow, MISI Publ., 2021, pp. 109–112.
34. Mironov S. A. *Teoriya i metody zimnego betonirovaniya* [The theory and methods of concreting]. 3-d ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975, 700 p.
35. Mukhametrakhimov R. Kh., Galautdinov A. R., Garafiev A. M. *Elektroodnyy progrev betona s primeneniem tokoprovodyashchego minerala* [Electrode heating

of concrete using a conductive mineral]. *Izvestiya Kazanskogo gos. arkhит.-stroit. un-ta* – Bulletin of the Kazan State. Architecture and Construction University, 2019, no. 4 (50), pp. 418–426.

36. Mukhametrakhimov R. Kh., Galautdinov A. R., Potapova L. I., Garafiev A. M. *Issledovanie strukturoobrazovaniya modifitsirovannogo shungitsoderzha-*

shchego tsementnogo kamnya metodom IK-spektroskopii [Research on the structure formation of modified shungite-containing cement stone by IR spectroscopy]. *Izvestiya Kazanskogo gos. arkhит.-stroit. un-ta* – Bulletin of the Kazan State Architecture and Construction University, 2021, no. 4 (58), pp. 70–81.