

УДК 693.547.3

Мухаметрахимов Рустем Ханифович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Галаутдинов Альберт Радикович

кандидат технических наук, старший преподаватель

E-mail: galautdinov89@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Гарафиев Айнур Маратович

руководитель группы отдела экспертиз и испытаний

E-mail: garafiev93@mail.ru

ООО ПИИ «Центр экспертиз и испытаний в строительстве»

Адрес организации: 420097, Россия, г. Казань, ул. Шмидта, д. 35

Электродный прогрев бетона с применением токопроводящего минерала

Аннотация

Постановка задачи. В технологии зимнего бетонирования, по мере протекания процессов гидратации и испарения части воды при электродном прогреве бетона, происходит увеличение его электрического сопротивления и, соответственно, затрат электроэнергии. При достижении бетоном 40 % марочной прочности дальнейший прогрев становится затруднителен и малоэффективен. В этой связи актуальным становится вопрос повышения эффективности электродного прогрева, решение которого позволит повысить качество бетонных конструкций и снизить затраты электроэнергии при производстве бетонных работ в зимнее время. Для этого авторами предлагается модифицировать состав бетонной смеси небольшим количеством токопроводящего минерала – шунгита. Цель данной работы состоит в изучении влияния молотого шунгита на показатели эффективности электродного прогрева бетона (температуры бетонной смеси, электрического сопротивления и прочности бетона) при зимнем бетонировании.

Результаты. Установлено, что модифицирование бетонной смеси молотым шунгитом способствует снижению электрического сопротивления бетона при электродном прогреве, увеличению температуры по сравнению с немодифицированным составом в первые сутки прогрева, а также увеличение темпов набора прочности бетона. Показано, что введение шунгита в состав бетонной смеси в количестве 1 % от массы цемента не приводит к существенному изменению кинетики тепловыделения цементного вяжущего, что свидетельствует об увеличении температуры бетонной смеси при электродном прогреве за счет токопроводящего минерала шунгита.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в повышении эффективности электродного прогрева бетона с применением токопроводящего минерала шунгита и возможности снижения материальных затрат на его осуществление в технологии зимнего бетонирования.

Ключевые слова: зимнее бетонирование, электродный прогрев, бетон, токопроводящий минерал, шунгит.

Введение

В современных условиях строительства значительно возросли объемы монолитных работ в зимний период времени. Кроме того появление на строительном рынке новых конструктивно-технологических решений сборно-монолитных каркасных зданий [1] привело к повышению требований к качеству зимнего бетонирования. Основная особенность производства бетонных работ в зимний период времени (при температурах ниже +5°C) заключается в необходимости набора бетоном критической прочности до начала процессов кристаллизации химически несвязанной воды [2], что позволяет исключить возникновение внутренних напряжений, разрушающих структуру бетона [3].

Для этого необходимо обеспечить положительную температуру бетонной смеси на период набора критической прочности [4].

Известны различные способы зимнего бетонирования, основанные на применении противоморозных добавок¹ [5], обогреве бетона термоактивной опалубкой [6], греющими проводами, инфракрасными лучами и др. [7, 8]. Возможно также применение комбинированных способов зимнего бетонирования. Так в работе [9] дается предположение о рациональности комбинированного безобогревного и обогревного методов бетонирования при отрицательных температурах, например, применение противоморозных добавок в сочетании с обогревом греющими проводами.

Особенности электродного прогрева бетона

Одним из относительно слабо эффективных методов искусственного прогрева бетона является электродный прогрев. Способ электродного прогрева бетонной смеси в конструкциях основан на использовании выделяемой теплоты при прохождении через него электрического тока [10]. Для электродного прогрева бетонных конструкций находят применение пластинчатые, полосовые, струнные и стержневые электроды. Различают сквозной электродный прогрев для конструкций значительной толщины или сложной формы (электроды размещаются внутри конструкции) и периферийный электродный прогрев для конструкций любой массивности (электроды размещаются на поверхности конструкций) [11]. В работе [12] показана эффективность электродного прогрева бетона дисперсно-армированного стальными фибрами, при этом существенный вклад в усредненную электропроводность вносит контактный слой фибра-бетона. Электропроводность смеси повышается пропорционально проценту фибрового армирования. Результаты исследований могут быть полезны при назначении режимов электропрогрева, а также при расчете удельной проводимости и коэффициента теплопроводности дисперсно-армированного бетона. Это в определенной степени позволяет сделать предположение об эффективности введения в бетонную смесь токопроводящего минерала при электродном прогреве [13]. В работе [14] показана возможность электротепловой обработки сборных бетонных и железобетонных изделий. Авторами отмечается, что результаты электротепловой обработки бетона в значительной степени зависят от величины и характера изменения градиентов температуры в объеме материала и динамики набора прочности бетоном, при этом существует возможность благоприятного управления величиной температурных градиентов в материале при электротепловой обработке путем изменения ее параметров.

Температурный режим прогрева разделяется на три стадии:

- подъем температуры бетона;
- изотермический прогрев: поддержание в бетоне заданной температуры; в большинстве случаев на стадии изотермического прогрева достигается критическая прочность бетона;
- остывание бетона в конструкции: при остывании до 0°С процессы структурообразования и набора прочности в бетоне продолжают, что учитывается при бетонировании массивных конструкций.

Нарушение температурного режима прогрева может привести к пережогу бетона в результате перегрева бетонной смеси выше 100°С, недостаточному набору прочности, образованию локальных трещин и др. Напротив, недостаточный прогрев бетона или его отсутствие приводит к замерзанию химически несвязанной воды, возникновению внутренних напряжений, разрушающих структуру бетона и снижающих его прочность. На поверхности конструкций при этом образуются характерные следы «промороженного» бетона (рис. 1).

Входящие в состав бетона вяжущие и заполнители в сухом состоянии обладают высоким сопротивлением, а жидкая фаза бетона выступает проводником электрического тока. Количество и качество жидкой фазы в значительной степени влияет на изменение

¹Мавлюбердинов А.Р., Изотов В.С., Нургатин И.И. Изучение механизмов влияния противоморозных добавок на свойства растворов смесей // Известия КГАСУ. 2014. № 2 (28). С. 173–178.

удельного сопротивления бетона. Если проследить за этими изменениями, то можно различить три основных стадии:

- понижение удельного сопротивления;
- постепенная стабилизация удельного сопротивления;
- прогрессирующее возрастание удельного сопротивления.

Этим трем стадиям соответствуют следующие стадии формирования 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.

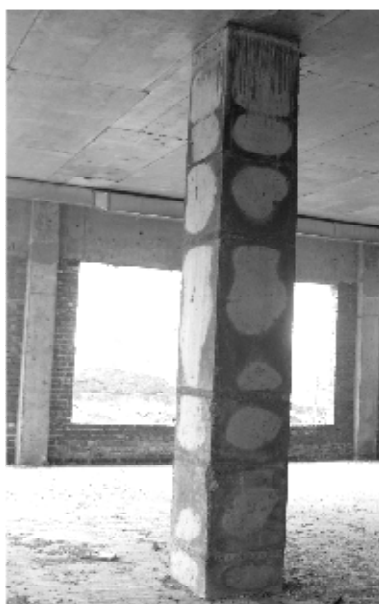


Рис. 1. Участки «промороженного» бетона колонны (иллюстрация авторов)

По мере протекания процессов гидратации бетонной смеси и испарения части воды при прогреве происходит увеличение сопротивления бетонной смеси и, соответственно, затрат электроэнергии. При достижении бетоном 40 % марочной прочности дальнейший прогрев становится затруднителен и в ряде случаев бетон не успевает набрать критическую прочность [15]. В этой связи актуальным становится вопрос повышения эффективности электродного прогрева, решение которого позволит повысить качество бетонных конструкций и снизить затраты электроэнергии при производстве бетонных работ в зимнее время [11].

На основании анализа литературных данных авторами сформулирована рабочая гипотеза, заключающаяся в возможности поддерживать оптимальное удельное сопротивление конструкции и, как следствие, в сокращении затрат электроэнергии и времени набора критичной прочности бетона за счет применения в составе бетонной смеси тонкомолотого токопроводящего материала – шунгита. Высокая электрическая проводимость шунгитовых пород обусловлена специфичным характером распределения углерода в объеме породы. Помимо токопроводящих свойств данный минерал характеризуется высокой прочностью, плотностью и химической стойкостью. Кроме того в работе [16] показано, что модифицирование шунгитовыми породами облицовочных материалов и изделий позволяет придать им радиозащитные свойства².

²Мухаметрахимов Р.Х., Шафигуллин Р.И., Куприянов В.Н. Разработка радиозащитных шунгитосодержащих гипсоволокнистых облицовочных листов // Известия КГАСУ. 2017. № 3 (41). С. 224–231.

Материалы и методы исследований

Для проверки предложенной гипотезы авторами были проведены экспериментальные исследования влияния содержания шунгита в составе бетонной смеси на изменение температуры, электрического сопротивления и прочности бетона при электродном прогреве. Твердение происходило в естественных условиях при температуре окружающей среды -15°C .

Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено 2 состава бетона:

- состав № 1 – контрольный состав (бетон класса В30 без добавления шунгита);
- состав № 2 – модифицированный состав (с добавлением шунгита в количестве 1 % от массы цемента).

Эксперимент проводился на образцах размерами $19 \times 18 \times 16,5$ см. Твердение бетона происходило под воздействием электродного прогрева. Прочность бетона на сжатие определялась по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» на испытательном прессе ИП-1000. Электрическое сопротивление бетонных образцов при электродном прогреве определялось с помощью мультиметра, температура – с помощью ртутных термометров, погруженных в тело образцов. Наблюдения за результатами эксперимента производились в течение 115 часов с интервалом в 1 час. Для определения влияния шунгита на изменение температуры бетона при электродном прогреве изучена кинетика тепловыделения при гидратации цемента с использованием измерительного комплекса «Термохрон Ревизор DS1921» с частотой регистрации температуры равной 1 минуте. Для определения влияния токопроводящего минерала шунгита на гидратацию вяжущего исследована контракция портландцемента и прогноз его активности по методикам измерения МИ 2486-98 и МИ 2487-98 при помощи контракциометрического тестера активности цемента «Цемент-прогноз».

Результаты исследований

Зависимости температуры от времени гидратации исходного и модифицированного составов вяжущего приведены на рис. 2.

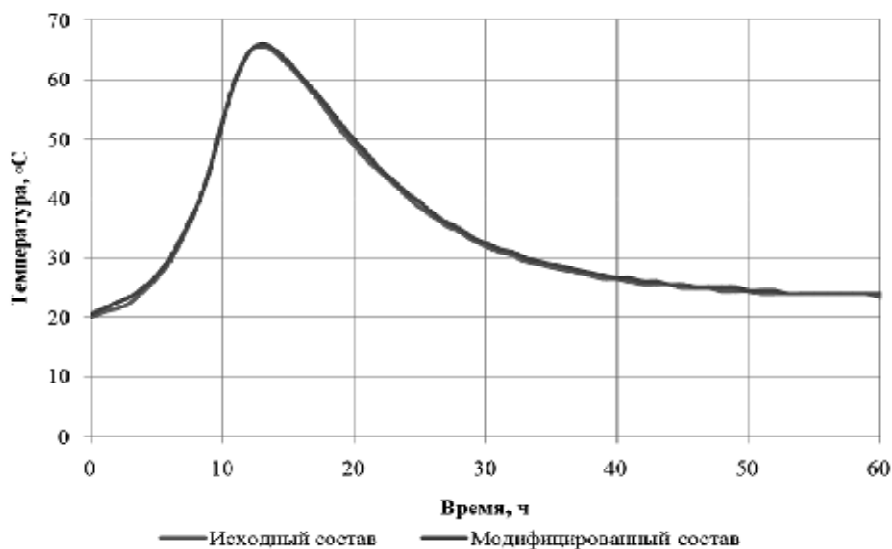


Рис. 2. Кинетика тепловыделения при гидратации исходного и модифицированного составов вяжущего (иллюстрация авторов)

Как видно по рис. 2, введение шунгита в количестве 1 % от массы цемента не приводит к изменению кинетики тепловыделения модифицированного состава вяжущего, что свидетельствует об отсутствии его существенного влияния на процессы тепловыделения при гидратации цемента.

Результаты исследования контракции цемента за 8 часов свидетельствуют о замедлении процессов модифицированного состава вяжущего по сравнению с исходным.

Так величина контракции исходного состава составляет 8,15 мл, модифицированного тонкомолотым шунгитом – 5,18 мл.

Зависимость изменения температуры бетонных образцов исходного и модифицированного составов от времени их прогрева приведены на рис. 3.

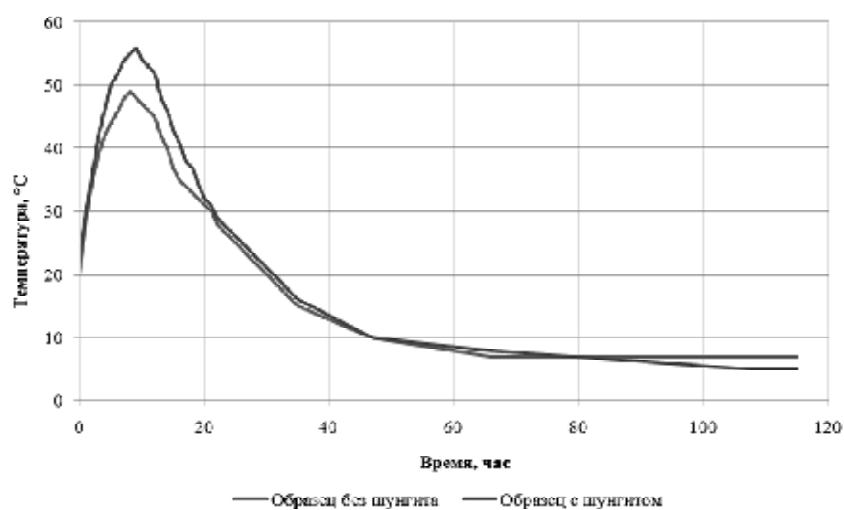


Рис. 3. Зависимость изменения температуры бетонных образцов исходного и модифицированного составов от времени их прогрева (иллюстрация авторов)

Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 3, свидетельствует об увеличении температуры модифицированного состава бетонной смеси по сравнению с исходным составом в интервале 0-20 часов электродного прогрева. В интервале 20-115 часов электродного прогрева температуры исходного и модифицированного составов бетона существенно не отличаются. Анализ и сопоставление результатов представленных на рис. 2-3 показывает, что введение шунгита в состав бетонной смеси в количестве 1 % от массы цемента не приводит к существенному изменению кинетики тепловыделения цементного вяжущего при его гидратации, что свидетельствует об увеличении температуры бетонной смеси при электродном прогреве за счет токопроводящих свойств минерала. Зависимости изменения сопротивления прогреваемых образцов бетона во времени приведены на рис. 4.

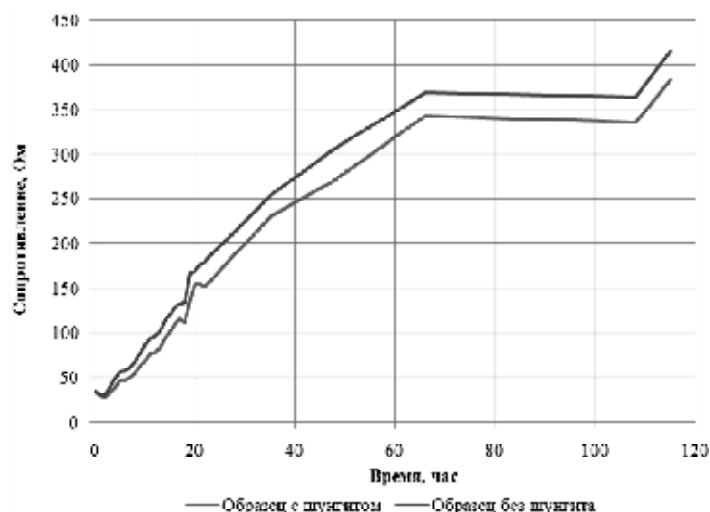


Рис. 4. График изменения сопротивления прогреваемых образцов бетона во времени (иллюстрация авторов)

На полученных диаграммах (рис. 4) можно наблюдать, что величина сопротивления электрического тока, в образце бетона, модифицированного шунгитом, меньше по сравнению с исходным составом. Это свидетельствует о повышении

эффективности электродного прогрева при введении шунгита в бетонную смесь. Кроме того, образец бетона, модифицированный шунгитом, в количестве 1 % от массы цемента, при прогреве в течение 115 часов набрал прочность 54,2 %, а образец без шунгита – 45,2 % от проектного класса В30. Результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 3-4, подтверждают сформулированную выше рабочую гипотезу.

Выполненные исследования показывают положительное влияние шунгитовых пород на эффективность электродного прогрева бетона. Это обусловлено снижением электрического сопротивления модифицированных бетонных образцов и увеличением температуры модифицированного состава бетонной смеси по сравнению с исходным составом в начальный период электродного прогрева, что приводит к интенсификации процессов гидратации и возрастанию прочности образцов.

Заключение

1. Анализ литературных данных свидетельствуют об эффективности введения в бетонную смесь токопроводящих материалов, позволяющих повысить эффективность электродного прогрева бетона.

2. Выявлено, что введение шунгита в количестве 1 % от массы цемента не приводит к существенному изменению кинетики тепловыделения цементного вяжущего, что свидетельствует об отсутствии влияния относительно небольшого содержания шунгитовых пород (1 %) на процессы его гидратации.

3. Определено, что контракция состава, модифицированного тонкомолотым шунгитом в количестве 1 % от массы цемента (5,18 мл), ниже величины контракции исходного не модифицированного состава (8,15 мл), что свидетельствует о замедлении процессов его гидратации и подтверждает отсутствие влияния шунгита на повышение прочностных показателей бетона при электродном прогреве.

4. Установлено, что модифицирование бетонной смеси молотым шунгитом в количестве 1 % от массы цемента способствует увеличению температуры бетонной смеси по сравнению с исходным составом в интервале 0-20 часов электродного прогрева на величину до 8 °С. Кроме того, наблюдается снижение электрического сопротивления модифицированной бетонной смеси при электродном прогреве и увеличение темпов набора прочности бетона. Так образец бетона, модифицированный шунгитом, после 115 часов прогрева набрал прочность 54,2 %, а образец без шунгита – 45,2 % от проектного класса В30. Полученные результаты свидетельствуют о повышении эффективности электродного прогрева бетона с шунгитом и снижении материальных затрат на его осуществление.

5. Выполненные исследования подтверждают рабочую гипотезу, заключающуюся в возможности поддерживать оптимальное удельное сопротивление бетонной конструкции при электродном прогреве и, как следствие, сократить затраты электроэнергии и время набора критической прочности бетона за счет применения в составе бетонной смеси тонкомолотого токопроводящего материала – шунгита.

6. Интерес для дальнейших исследований представляет изучение влияния содержания тонкомолотого шунгита в составе бетонных смесей на особенности структурообразования и свойства бетона, подвергнутого электродному прогреву, а также определение оптимальных режимов прогрева модифицированных составов.

Список библиографических ссылок

1. Крылов Б. А. Монолитное строительство, его состояние и перспективы совершенствования // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. Вып. 4. № 159. С. 35–38.
2. Головнев С. Г. Зимнее бетонирование: этапы становления и развития // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура. 2013. Вып. 2. № 31. С. 529–534.
3. Zhang G., Haiyang Y., Huaming L., Yingzi Y. Experimental study of deformation of early age concrete suffering from frost damage // Constr. Build. Mater. Elsevier. 2019. Vol. 215. P. 410–421.

4. Семенов К. В., Барабанщиков Ю. Г. Термическая трещиностойкость массивных бетонных фундаментных плит и ее обеспечение в строительный период зимой // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 2. С. 125–135.
5. Karagol F., Demirboga R., Khushefati W. H. Behavior of fresh and hardened concretes with antifreeze admixtures in deep-freeze low temperatures and exterior winter conditions // Constr. Build. Mater. 2015. Vol. 76. P. 388–395.
6. Мавлюбердинов А. Р., Сунгатуллина Г. А. Изучение процессов твердения бетонной смеси в термоактивной опалубке // Вестник Технологического университета. 2015. Вып. 18. № 7. P. 181–183.
7. Brzhanov R. T., Pikus G. A., Traykova M. Methods of increasing the initial strength of winter concrete // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 451. № 1.
8. Lazniewska-Piekarczyk B., Miera P. Frost Resistance of Concrete from Innovative Air-Entraining Cements // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 603. № 4.
9. Рязанова Г. Н., Попова Д. М. Применение комплекса из обогревного и необогревного способов выдерживания бетона в зимних условиях с позиции энергоэффективности // Наука молодых – будущее России. 2018. С. 238–241.
10. Кобылина М. А., Калошина С. В. Технологии зимнего бетонирования // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. Вып. 2. С. 214–223.
11. Ивахникова А. С. Электродный прогрев бетона : сб. ст. XXXI Международной научно-практической конференции WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS. Пенза, 2019. С. 68–70.
12. Матус Е. П. Численное моделирование электропрогрева дисперсноармированного бетона с фибрами высокой проводимости // Вестник евразийской науки. 2019. Вып. 2. № 11. С. 1–9.
13. Armoosh S. R., Oltulu M. Effect of Different Micro Metal Powders on the Electrical Resistivity of Cementitious Composites // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 471. № 3.
14. Федосов С. В., Бобылев В. И., Соколов А. М. Температурные характеристики электротепловой обработки бетона посредством электродного прогрева // Строительные материалы. 2011. № 12. С. 56–59.
15. Богатырева Т. В., Марьясов Р. С. Научное обоснование энергосберегающей технологии зимнего бетонирования буронабивных свай // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 3. С. 38–51.
16. Куприянов В. Н., Морозов О. Г., Насыбуллин А. Р., Шафигуллин Р. И. К исследованию ослабления электромагнитных волн ограждающими конструкциями зданий // Приволжский научный журнал. 2016. Вып. 1. № 37. С. 38–45.

Mukhametrakhimov Rustem Khanifovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Galautdinov Albert Radikovich

candidate of technical sciences, senior lecturer

E-mail: galautdinov89@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Garafiev Ajnur Maratovich

head of team of expert examination and testing department

E-mail: garafiev93@mail.ru

LLC ПИ «Centr ekspertiz i ispytanij v stroitel'stve»

The organization address: 420097, Russia, Kazan, Shmidta st., 1

Electric curing of concrete using conductive mineral

Abstract

Problem statement. Hydration and evaporation of water during electric curing of concrete leads to an increase in its electrical resistance and the cost of electricity. Further heating

becomes difficult and ineffective in achieving curing period corresponding to achieved 40 % of the compressive strength of concrete. Increasing the efficiency of electric curing of concrete is relevant in this regard. Solving this problem will improve the quality of concrete structures and reduce energy costs while cold weather concreting. The authors propose to modify the composition of the concrete mix with a small amount of a conductive mineral – shungite. The goal of this work is to study the effect of ground shungite on the performance indicators of electrode heating of concrete (concretemix temperature, electrical resistance and concrete strength) during cold weather concreting.

Results. It has been established that the modification of concrete mix with ground shungite leads to low electrical resistance of concrete with increasing temperature compared to unmodified composition in the first day of heating. It is shown that the introduction of shungite into the concrete mix in an amount of 1 % by weight of cement does not lead to a significant change in the kinetics of heat release of the cement binder, indicating an increase in the temperature of the concrete mixture during electric curing of concrete due to the conductive mineral shungite.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry is to increase the efficiency of electric curing of concrete using conductive mineral shungite and the possibility of reducing material costs in cold weather concreting.

Keywords: cold weather concreting, electric curing of concrete, concrete, conductive mineral, shungite.

References

1. Krylov B. A. Monolithic construction, situation and prospects for improvement // *Stroitelnyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka*. 2012. Vol. 4. № 159. P. 35–38.
2. Golovnev S. G. Cold water concreting: stages of formation and development // *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. Ser. Stroitel'stvo i arkhitektura. 2013. Vol. 2. № 31. P. 529–534.
3. Zhang G., Haiyang Y., Huaming L., Yingzi Y. Experimental study of deformation of early age concrete suffering from frost damage // *Constr. Build. Mater. Elsevier*. 2019. Vol. 215. P. 410–421.
4. Semenov K. V., Barabanshikov Y. G. Thermal crack resistance of massive concrete foundation slabs and its provision during the construction period in winter // *Stroitel'stvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2014. № 2. P. 125–135.
5. Karagol F., Demirboga R., Khushefati W. H. Behavior of fresh and hardened concretes with antifreeze admixtures in deep-freeze low temperatures and exterior winter conditions // *Constr. Build. Mater.* 2015. Vol. 76. P. 388–395.
6. Mavlyuberdinov A. R., Sungatullina G. A. Studying the hardening processes of concrete mix in thermoactive formwork // *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2015. Vol. 18. № 7. P. 181–183.
7. Brzhanov R. T., Pikus G. A., Traykova M. Methods of increasing the initial strength of winter concrete // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 451. № 1.
8. Lazniewska-Piekarczyk B., Miera P. Frost Resistance of Concrete from Innovative Air-Entraining Cements // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 603. № 4.
9. Ryazanova G. N., Popova D. M. The use of a complex of heating and non-heating methods of curing concrete in winter conditions from the point of view of energy efficiency // *Nauka molodyh – budushchee Rossii*. 2018. P. 238–241.
10. Kobylina M. A., Kaloshina S. V. Cold weather concreting technologies // *Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*. 2017. Vol. 2. P. 214–223.
11. Ivahnikova A. S. Electrode heating of concrete // *Digest of articles, XXXI International Scientific and Practical Conference WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS*. 2019. P. 68–70.
12. Matus E. P. Numerical simulation of electric curing disperse-reinforced concrete with high conductivity fibers // *Vestnik evraziyskoy nauki*. 2019. Vol. 2. № 11. P. 1–9.

13. Armoosh S. R., Oltulu M. Effect of Different Micro Metal Powders on the Electrical Resistivity of Cementitious Composites // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 471. № 3.
14. Fedosov S. V., Bobylev V. I., Sokolov A. M. Temperature characteristics of electrothermal treatment of concrete by electric curing // Stroitelnyye materialy. 2011. № 12. P. 56–59.
15. Bogatyreva T. V., Maryasov R. S. Scientific substantiation of energy-saving technology for cold weather concreting of bored piles // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo. 2010. № 3. P. 38–51.
16. Kupriyanov V. N., Morozov O. G., Nasybullin A. R., Shafigullin R. I. The Question of attenuation of electromagnetic waves by the building envelope // Privolzhskiy nauchnyy zhurnal. 2016. Vol. 1. № 37. P. 38–45.