

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК.693.547.14

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-139-149

*М.И. БАТЮК¹, Б.С. ВОДНЕВ¹, А.И. ГНЫРЯ¹,
С.В. КОРОБКОВ¹, В.Я. УШАКОВ²,*

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

²Национальный исследовательский

Томский политехнический университет

О СПОСОБЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ ПОЛЕМ В ОБЪЁМЕ РАЗОГРЕВАЕМОЙ БЕТОННОЙ СМЕСИ*

Аннотация. Предварительный электроразогрев бетонной смеси, обладающий значительным потенциалом повышения энергоэффективности этапа тепловой обработки, является методом, используемым в области зимнего бетонирования, перспективным для применения в технологии производства сборного железобетона. Однако на сегодняшний день преимущества предварительного электроразогрева бетонной смеси используются не в полной мере. Одной из проблем, ограничивающих его применение, является возникновение температурных перепадов в разогреваемом объёме.

Статья посвящена проработке приёмов и средств обеспечения однородности температурного поля в объёме бетонной смеси при её форсированном электроразогреве.

Концепция предлагаемого способа заключается в замене пластинчатых электродов группой независимо управляемых электродов меньших размеров, что придаёт системе гибкость и делает возможным производить условно непрерывную подстройку электрического, а следовательно, и теплового поля.

В работе описаны этапы решения задачи, применяемое оборудование, а также принцип построения алгоритма программы управления процессом разогрева.

Ключевые слова: бетон, железобетон, предварительный электроразогрев бетонной смеси, тепловое поле, монолитное строительство, зимнее бетонирование

Для цитирования: Батюк М.И., Воднев Б.С., Гныря А.И., Коробков С.В., Ушаков В.Я. О способе управления тепловым полем в объёме разогреваемой бетонной смеси // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 6. С. 139–149.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-139-149

* Работа выполнена при поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0003.

M.I. BATYUK¹, B.S. VODNEV¹, A.I. GNYRYA¹,
S.V. KOROBKOV¹, V.Ya. USHAKOV²,

¹Tomsk State University of Architecture and Building,

²National Research Tomsk Polytechnic University

THERMAL FIELD CONTROL IN HEATED CONCRETE MIXTURE

Abstract. Direct electric preheating of concrete mixture (DEPC), which significantly improves the energy efficiency of thermal curing stage, is mostly used in winter concreting and is promising for application in precast concrete production. However, to date, DEPC is not fully utilized. One of its limitations is the temperature difference in the heated volume. The paper proposes methods and means of achieving the uniform temperature field distribution in the heated concrete mixture. The proposed method includes the replacement of plate electrodes by a group of independently controlled electrodes of a smaller size, that makes the system flexible and capable of controlling the electric and, consequently, thermal field. The paper describes the equipment, principles of constructing the algorithm for the heating process control program.

Keywords: concrete, precast concrete, direct electric preheating, concrete mixture, thermal field, cast-in-place construction, winter concreting

For citation: Batyuk M.I., Vodnev B.S., Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Ushakov V.Ya. O sposobe upravleniya teplovym polem v ob"eme razogrevaemoi betonnoi smesi [Thermal field control in heated concrete mixture]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 6. Pp. 139–149.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-6-139-149

В настоящее время для тепловой обработки (ТО) железобетонных изделий (ЖБИ) применяются методы, основанные на теплообмене конвекцией (паро-тепловая обработка, прогрев в среде продуктов сгорания природного газа, прогрев горячим воздухом), а также на подведении тепла кондукцией (термообработка через разделительные стенки кассет, матриц, греющих полотен) [1–3]. Ввод тепловой энергии в объём изделия происходит через его поверхность, вследствие чего в процессе нагревания и выдерживания температурное поле изделия характеризуется существенной неравномерностью [4].

Исследования и практический опыт ТО ЖБИ показывают, что неравномерность температурного поля в твердеющем бетоне приводит к ухудшению его качественных показателей. По мере увеличения толщины изделия и интенсивности его нагрева наблюдается нарушение структуры бетона, проявляющееся в появлении горизонтальных трещин, преимущественно в поверхностных слоях. С целью минимизации образования деструктивных процессов стандартный цикл ТО, как правило, включает в себя период предварительной выдержки ($\tau_1 = 1–2$ ч), период медленного подъёма температуры ($\tau_2 = 2–3$ ч), период изотермической выдержки ($\tau_3 = 8–12$ ч) и период остывания ($\tau_4 = 2–3$ ч) [3–5]. Такая продолжительность теплового воздействия ведёт к дополнительным затратам энергии на нагрев элементов оборудования и потере в окружающую среду, а также на работу вспомогательного оборудования (насосы, вентиляторы, КИПиА). По оценкам специалистов, КПД данных методов находится

в диапазоне 10–40 %. Также следует отметить, что даже при столь длительном цикле не всегда удаётся обеспечить градиент температуры, не выходящий за рамки предельно допустимого (0,15 °C/см) [5].

На долю ТО приходится 40–60 % от суммарных энергозатрат, что составляет 5–10 % стоимости продукции, а её продолжительность составляет в среднем 70–80 % общей длительности производственного цикла. Поэтому в настоящее время тепловая обработка, как самый длительный и дорогостоящий технологический этап, становится наиболее актуальным объектом исследования в аспекте повышения энергоэффективности и сокращения длительности технологического процесса [6, 7].

Одним из перспективных направлений для решения данной задачи является совершенствование и внедрение в технологию производства ЖБИ методов электротермического воздействия, отличающихся более высоким КПД благодаря непосредственному тепловыделению в объёме бетона за счёт протекания электрического тока [7–9]. Наиболее эффективным из них, с позиции физики протекающих в бетоне процессов и рациональности использования пространства, является метод предварительного электроразогрева бетонной смеси (ПЭРБС) [10, 11]. Использование всех его преимуществ может способствовать снижению энергопотребления в 3 и более раза, повышению качества конечного продукта, сокращению ряда эксплуатационных издержек [10].

Однако на сегодняшний день значительная доля потенциала ПЭРБС не реализована и его применение остаётся в основном ограниченным [12, 13]. Обусловлено это тем, что используемое оборудование и технологии не обеспечивают равномерного нагрева бетонной смеси по объёму [13, 14]. На данный момент имеется крайне мало технических решений и работ, посвящённых данному направлению. Из проведённой патентной проработки следует, что предлагаемые на сегодняшний день устройства обеспечения равномерного температурного поля по большей мере основаны на механических принципах и содержат вращающиеся части (что крайне нерационально, ненадёжно и применимо не для всех составов бетона). Технические решения, основанные на электротехнических принципах, гораздо меньше. Однако и они по большей мере примитивны (например, не имеют обратной связи и не обладают достаточной гибкостью) и привязаны к геометрии ёмкости, что не является гарантией достижения однородности установленного уровня, особенно при отклонении электрических параметров питающей сети.

Целью настоящей работы является проработка приемов и средств обеспечения однородности температурного поля в объёме бетонной смеси при её форсированном разогреве. В статье излагается процесс разработки способа управления и непрерывной подстройки теплового поля в объёме разогреваемой бетонной смеси.

Для того чтобы иметь возможность искусственно создавать типовые электрические и тепловые поля, возникающие при электроразогреве бетонной смеси, а также изучить закономерность их распределения в зависимости от конфигурации, состояния и взаимного расположения электродов, необходимо создать гибкую систему (модель) с относительно большим количеством электродов и возможностью их оперативной коммутации.

Первой частью решения поставленной задачи был выбор конструкции стенок, материала и расположения электродов. Исходя из анализа существующих конструкций средств электротермического воздействия, было принято решение использовать плоские электроды. Данный выбор обусловлен тем, что разрабатываемая конструкция в случае её успешной реализации на следующем этапе будет служить элементом прототипа системы равномерного разогрева смеси. Поскольку при использовании стержневых электродов неизбежно формирование резконеоднородных электрических полей, то данный вариант был признан нами неприемлемым. Стенки ёмкости было принято выполнить в виде «матриц» из равномерно размещённых по площади электродов. Таким образом, изменение комбинации включения электродов сделает возможным получение электрических полей различных конфигураций, что вполне отвечает требованиям реализации установленной концепции. Экспериментальные исследования показали, что наиболее подходящая форма электродов – это круг или овал, а материал – сталь или графит.

При выборе диэлектрического материала для футеровки стенок было экспериментально опробовано несколько вариантов (текстолит, эпоксидная смола, фторопласт, полиамид). Наиболее подходящим оказался полиамид-6, поскольку он является плотным материалом, обладающим пониженной адгезией, повышенной механической стойкостью и постоянством электроизоляционных свойств в рабочем температурном диапазоне. На рис. 1 представлен один из вариантов физической модели ёмкости. Она выполнена в виде герметичной формы с откидными бортами, что также позволяет применять её при исследованиях электродного прогрева с последующей распалубкой образца. В данном варианте в каждую из стенок вмонтировано по 9 электродов. На основании проведённых экспериментов было установлено, что способ монтажа электродов заподлицо обеспечивает более однородное электрическое поле. Данный вариант рационален и с технологической точки зрения, поскольку значительно облегчает процесс очистки электродов. Также приемлем вариант незначительно выступающих электродов с закруглёнными гранями.



Рис. 1. Вариант физической модели ёмкости

Для обеспечения требуемой гибкости при управлении необходимо «выделить» на каждый из электродов как минимум по одному коммутационному

аппарату (КА). В качестве КА могут быть использованы электромагнитные реле/пускатели либо полупроводниковые ключи. Для управления КА и другими элементами силовой части схемы было разработано коммутирующее устройство (КУ) (рис. 2).

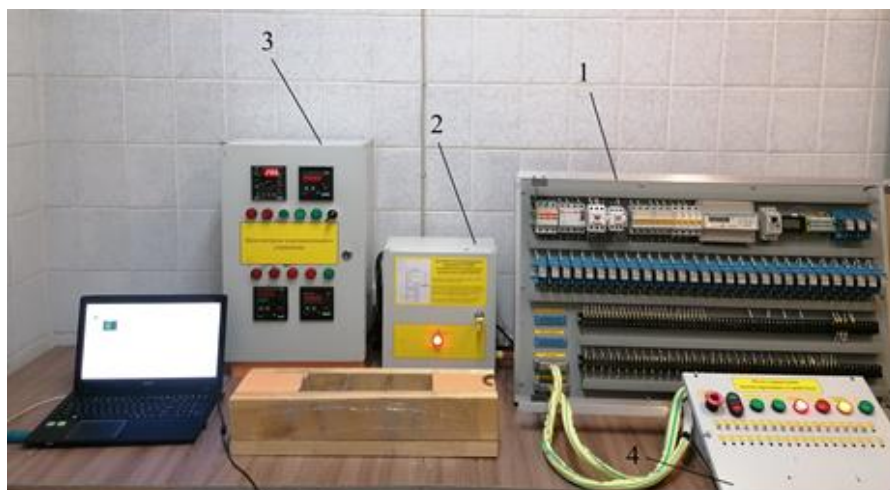


Рис. 2. Оборудование для проведения исследований:

1 – коммутирующее устройство; 2 – источник питания; 3 – блок автоматического управления; 4 – пульт управления

В процессе эксперимента изменение комбинации включения электродов можно осуществлять как вручную с пульта управления (ПУ), так и автоматически по заданной программе. Для этой цели к КУ может быть подключен блок автоматического управления и контроля (БАУ). В качестве источника питания электродов собран модуль на основе трансформатора с многовыводной вторичной обмоткой, обеспечивающей получение значений напряжения от 0 до 100 В (с шагом в 10 В) и с возможностью гальванической развязки цепей. Следует отметить, что лабораторный комплекс выполнен в модульном исполнении (ПУ, ИП, БАУ, ёмкость для разогрева смеси подключаются к КУ через разъёмы).

В ходе экспериментов изучался характер распределения температуры в зависимости от комбинаций включения электродов. Например, на рис. 3 представлена динамика изменения температуры по объёму ёмкости при указанной комбинации подключения электродов (чёрным цветом обозначены электроды, не подключенные к ИП, красным – подключенные; электроды, расположенные на стенке слева, подключены к одному выводу трансформатора, а расположенные справа – к другому). Очевидно, что в районе датчика t_4 температура будет несколько ниже. Нагрев данной области будет происходить в основном за счёт теплопроводности смеси. При более высоких скоростях разогрева разница $t_{cp} - t_4$ будет увеличиваться. В реальных условиях подобная ситуация может возникнуть, например, при обрастании электрода цементным камнем либо при обрыве электрической цепи. Введённый таким образом градиент может сохраниться после укладки неравномерно разогретой

смеси. С другой стороны, возможно преднамеренное применение данной комбинации в случае, если по какой-либо причине в зоне t_4 произошло превышение температуры. Если же подключить к ИП два ближайших к датчику t_4 электрода, то температура в данной зоне начнёт стремительно возрастать.

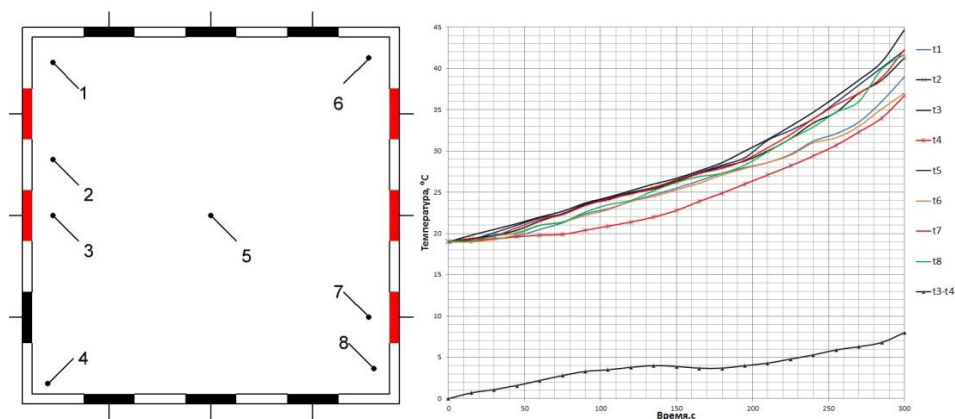


Рис. 3. Распределение температуры при несимметричном подключении электродов

Поскольку представляется возможным эмпирически получить подобные зависимости, то по мере наработки необходимого объёма статистических данных возможна разработка алгоритма условно непрерывной подстройки теплового поля.

Рассмотрим один из разработанных принципов построения алгоритма на примере системы, имеющей три характерные точки измерения температуры. Исходными данными являются: время разогрева T_p , конечная температура t_k , предельно допустимое отклонение температуры по объёму $\pm\Delta t$, график изменения температуры. Пусть $T_p = 10$ мин, $t_k = 70$ °C, $\pm\Delta t = 0,7$ °C, график изменения температуры линейный (рис. 4).

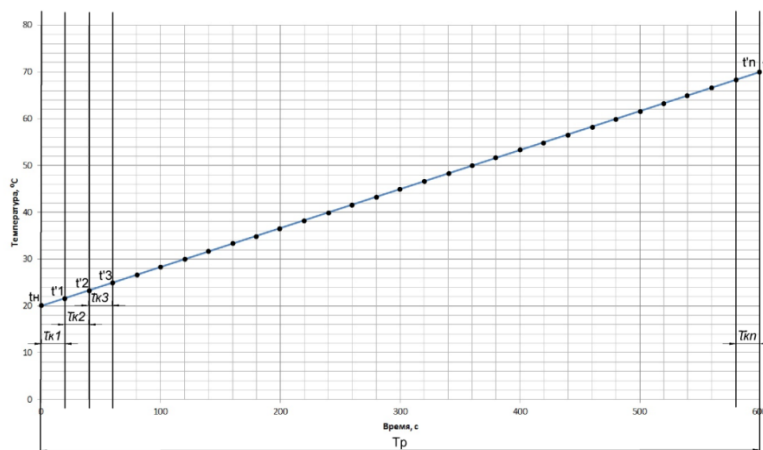


Рис. 4. Определение основных параметров для построения алгоритма

В зависимости от различных технологических факторов (инерционность среды, скорость нагрева, конфигурация электродов и т. п.) назначается период коррекции τ_k , представляющий собой равные отрезки времени, через которые необходимо произвести измерение текущего значения температуры и сравнить его с заданным для настоящего момента времени t' . В случае неравенства (с учётом предельно допустимого отклонения $\pm \Delta t$) необходимо произвести коррекцию теплового поля. Экспериментально выявлено, что оптимальный диапазон значений τ_k составляет 10–20 с. Однако для конкретного случая возможен подбор наиболее подходящего значения периода коррекции эмпирическим путём. Для определения значений температуры $t_1', t_2', t_3' \dots t_n'$ необходимо рассчитать шаг увеличения температуры t_y :

$$t_y = \frac{t_k - t_n}{T_p / \tau_k}.$$

Таким образом:

$$\begin{aligned} t_1' &= t_n + t_y; \\ t_2' &= t_n + t_y \cdot 2; \\ t_3' &= t_n + t_y \cdot 3; \\ &\dots \\ t_k' &= t_n' + t_y. \end{aligned}$$

Пусть для рассматриваемого случая $\tau_k = 10$ с, тогда

$$t_y = \frac{70 - 20}{600 / 10} = 0,833 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Данное значение будет добавляться к переменной t' с каждым проходом цикла программы. На рис. 5 представлен упрощённый вариант алгоритма коррекции температуры по трём контролируемым зонам. Данный принцип лежит в основе ПО, разработанного для микроконтроллера модуля автоматической подстройки. Программа имеет ряд опций, автоматизирующих некоторые операции. Например, не нужно вручную вводить значение t_n . Перед запуском процесса разогрева система обрабатывает сигналы с датчиков температуры и сохраняет среднее арифметическое значение, затем, исходя из хранящихся в памяти пользовательских параметров (τ_k , T_p и t_k), вычисляет значения t_y и t' . Также имеется функция отправки данных через СОМ-порт для их визуализации, обработки и архивации с помощью Excel и других инструментов. Программа снабжена функциями диагностики электрических цепей (например, на предмет обрыва), оповещения о внештатной ситуации и т. д.

На рис. 6 представлена упрощённая принципиальная схема системы равномерного электроразогрева. Сигналы с датчиков температуры, установленных в наиболее уязвимых точках объёма бункера, обрабатываются блоком управления. Исходя из полученной картины теплового поля, подбирается наиболее подходящая для обеспечения требуемого уровня однородности комбинация состояния электродов.

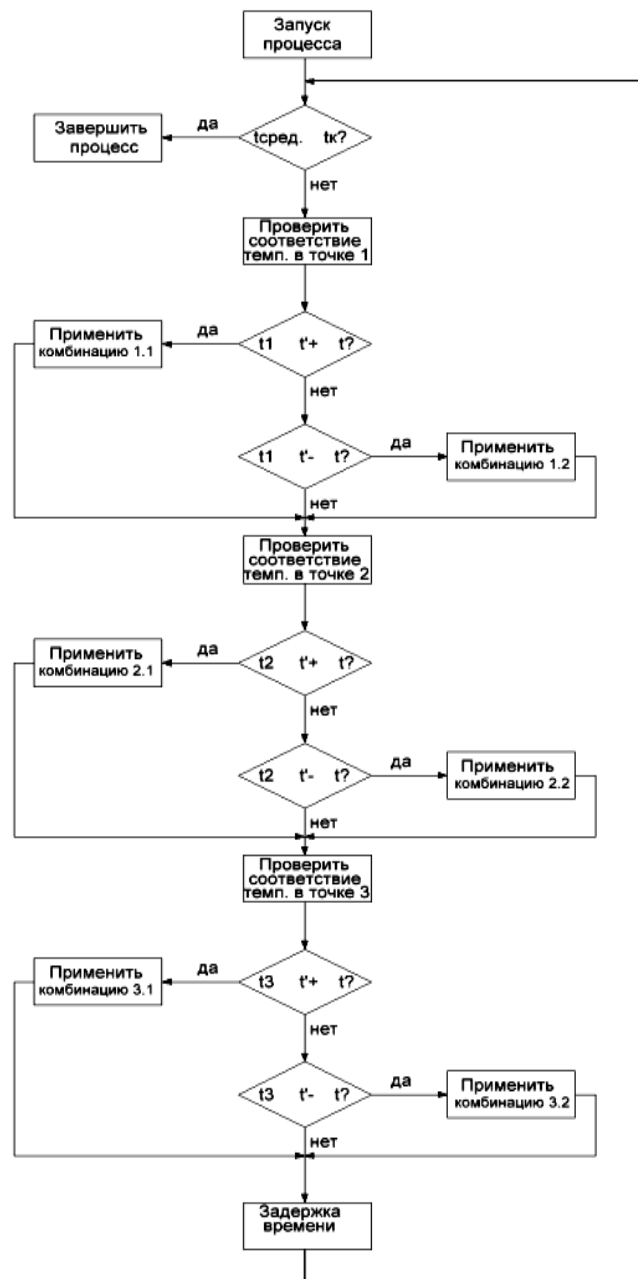


Рис. 5. Упрощённый вариант алгоритма контроля и коррекции температуры

На представленной схеме конкретная комбинация обеспечивается сменой состояния управляющих выходов управления катушками реле соответствующих электродов. В отдельных случаях возможно параллельное регулирование уровня напряжения источника питания, а также применение гальванической развязки цепей протекания тока сквозь объём бетонной смеси.

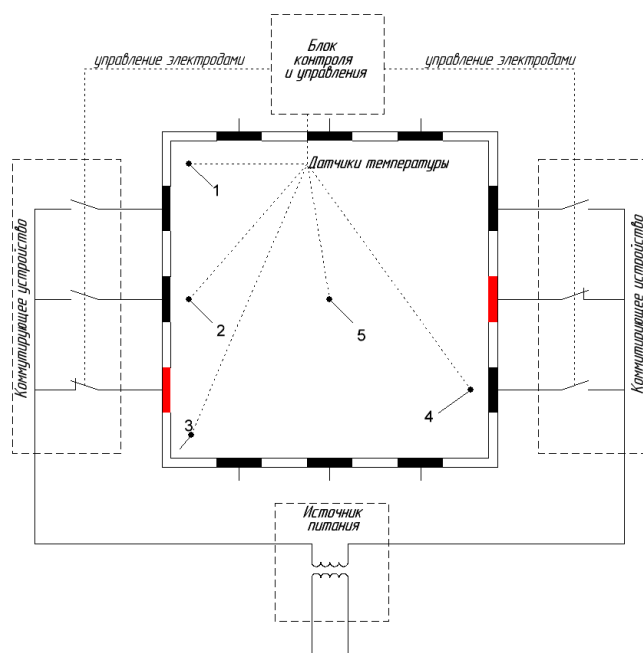


Рис. 6. Принципиальная схема системы равномерного разогрева бетонной смеси

Оригинальность изложенной идеи подтверждена патентом на изобретение [15]. При апробировании разработанной системы в лабораторных условиях разогрев смеси производился в ёмкости размером $100 \times 100 \times 100$ мм с контролем температуры в 4 зонах. При $\tau_k = 3$ с максимальный перепад температуры составил $0,7^\circ\text{C}$, что является ожидаемым и приемлемым результатом. Положительные результаты испытания разработанного комплекса методов и средств дают основания сделать вывод о целесообразности его дальнейшего развития и апробирования в промышленном масштабе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cecini D., Austin S.A., Cavalaro S., Palmeri A. Accelerated curing of steel-fibre reinforced concrete // Construction and Building Materials. 2018. V. 189. P. 192–204.
2. Tayfun Uygunoglu, Ismail Hocaoglu. Effect of electrical curing application on setting time of concrete with different stress intensity // Construction and building materials. 2018. V. 162. P. 298–305.
3. Wilson J.G., Gupta N.K. Equipment for the investigation of the accelerated curing of concrete using direct electrical conduction // Measurement. 2004. V. 35. P. 243–250.
4. Kafry I.D. Direct Electric Curing of Concrete: Basic Design. Whittle Publishing Services, 1993. 96 p.
5. Heritage I. Direct electric curing of mortar and concrete (PhD thesis). UK, Edinburg : Naiper University, 2001. 294 p.
6. Федосов С.В., Красносельских Н.В., Коровин О.В., Соколов А.М. Электротепловая обработка железобетонных изделий токами повышенной частоты в условиях малых предпрятий // Строительные материалы. 2014. № 5. С. 8–14.
7. Федосов С.В., Соколов А.М., Красносельских Н.В., Кузнецов А.Н. Состояние и перспективы применения электротепловой обработки строительных материалов и изделий то-

- ками повышенной частоты // Сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений. Курск : ЗАО «Университетская книга», 2015. С. 291–299.
8. Kovtun M., Ziolkowski M., Shekhovtsova J., Kearsley E. Direct electric curing of alkali-activated fly ash concretes: a tool for wider utilization of fly ashes // *Journal of Cleaner Production*. 2016. V. 133. P. 220–227.
 9. Zhao R.H., Tuan C.Y., Xu A., Fan D.B. Conductivity of ionically-conductive mortar under repetitive electrical heating // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 173. P. 730–739.
 10. Трембицкий С.М. Энергосберегающие технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций // *Бетон и железобетон*. 2004. № 6 (531). С. 23–26.
 11. Титов М.М., Власов В.А., Рязанов А.В., Южаков И.В. Совершенствование оборудования для предварительного электроразогрева бетонной смеси // *Проектирование и строительство в Сибири*. 2007. № 1 (37). С. 32–36.
 12. Гныря А.И., Титов М.М., Кузнецов С.М. Комплексная оценка надежности применения поворотного бункера для электроразогрева бетонных смесей // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2013. № 6 (654). С. 43–51.
 13. Гныря А.И., Титов М.М., Кузнецов С.М. Совершенствование устройств предварительного электроразогрева бетонных смесей // *Строительные и дорожные машины*. 2011. № 2. С. 22–25.
 14. Титов М.М., Гныря А.И., Кузнецов С.М. Совершенствование устройств для предварительного электроразогрева бетонных смесей // *Механизация строительства*. 2010. № 12. С. 7–11.
 15. Патент № 2723313 Российская Федерация, С1. Способ равномерного разогрева бетонной смеси / Батюк М.И., Ушаков В.Я., Гныря А.И., Краснятов Ю.А. 2020. 12 с.

REFERENCES

1. Cecini D., Austin S.A., Cavalaro S., Palmeri A. Accelerated curing of steel-fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. V. 189. Pp. 192–204.
2. Tayfun Uygunoglu, Ismail Hocaoglu. Effect of electrical curing application on setting time of concrete with different stress intensity. *Construction and building materials*. 2018. V. 162. Pp. 298–305.
3. Wilson J.G., Gupta N.K. Equipment for the investigation of the accelerated curing of concrete using direct electrical conduction. *Measurement*. 2004. V. 35. Pp. 243–250.
4. Kafry I.D. Direct electric curing of concrete: Basic design, whittle publishing services, 1993. 96 p.
5. Heritage I. Direct electric curing of mortar and concrete. PhD Thesis. UK, Edinburg: Naiper University, 2001. 294 p.
6. Fedosov S.V., Krasnoselskikh N.V., Korovin O.V., Sokolov A.M. Elektroteplovaya obrabotka zhelezobetonnykh izdelii tokami povyshennoi chastoty v usloviyakh malykh predpriyatii [Electric thermal treatment of reinforced concrete products with high-frequency currents at small production enterprises]. *Stroitel'nye materialy*. 2014. No. 5. Pp. 8–14. (rus)
7. Fedosov S.V., Sokolov A.M., Krasnosel'skikh N.V., Kuznetsov A.N. Sostoyanie i perspektivy primeneniya elektroteplovoy obrabotki stroitel'nykh materialov i izdelii tokami povyshennoi chastoty [Application of electric thermal treatment of building materials and products with high frequency currents]. In: *Sbornik nauchnykh statei Pervykh Mezhdunarodnykh Lykovskikh nauchnykh chtenii (Coll. Papers in memory of Lykov)*. Kursk: Universitetskaya kniga, 2015. Pp. 291–299. (rus)
8. Kovtun M., Ziolkowski M., Shekhovtsova J., Kearsley E. Direct electric curing of alkali-activated fly ash concretes: a tool for wider utilization of fly ashes. *Journal of Cleaner Production*. 2016. V. 133. Pp. 220–227.
9. Zhao R.H., Tuan C.Y., Xu A., Fan D.B. Conductivity of ionically-conductive mortar under repetitive electrical heating. *Construction and Building Materials*. 2018. V. 173. Pp. 730–739.
10. Trembitskii S.M. Energosberegayushchie tekhnologii izgotovleniya zhelezobetonnykh izdelii i konstrukttsii [Energy-saving technologies for manufacture of reinforced concrete products and structures]. *Beton i zhelezobeton*. 2004. No. 6(531). Pp. 23–26. (rus)

11. Titov M.M., Vlasov V.A., Ryazanov A.V., Yuzhakov I.V. Sovershenstvovanie oborudovaniya dlya predvaritel'nogo elektrorazogreva betonnoi smesi [Equipment improvement of electric pre-heating of concrete mixture]. *Proektirovanie i stroitel'stvo v Sibiri*. 2007. No. 1(37). Pp. 32–36. (rus)
12. Gnyrya A.I., Titov M.M., Kuznetsov S.M. Kompleksnaya otsenka nadezhnosti primeneniya povtornogo bunkera dlya elektrorazogreva betonnykh smesei [Integrated reliability assessment of rotary bunker for the electric heating of concrete mixes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*. 2013. No. 6 (654). Pp. 43–51. (rus)
13. Gnyrya A.I., Titov M.M., Kuznetsov S.M. Sovershenstvovanie ustroystv predvaritel'nogo elektrorazogreva betonnykh smesei [Improvement of devices for electric pre-heating of concrete mixtures]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2011. No. 2. Pp. 20–25. (rus)
14. Titov M.M., Gnyrya A.I., Kuznetsov S.M. Sovershenstvovanie ustroystv dlya predvaritel'nogo elektrorazogreva betonnykh smesei [Improvement of devices for electric pre-heating of concrete mixtures]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2010. No. 12. Pp. 7–11. (rus)
15. Batyuk M.I., Ushakov V.Ya., Gnyrya A.I., Krasnyatov Yu.A. Sposob ravnomernogo razogreva betonnoy smesi [Uniform heating of concrete mixture]. Patent Russ. Fed. N 2723313 C1, 2020. 12 p. (rus)

Сведения об авторах

Батюк Михаил Игоревич, мл. научный сотрудник, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, mb110@yandex.ru

Воднев Богдан Сергеевич, инженер-исследователь, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, bvodnev97@gmail.com

Коробков Сергей Викторович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, korobkov_1973@mail.ru

Гныря Алексей Игнатьевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tsp_tgasu@mail.ru

Ушаков Василий Яковлевич, докт. техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, vyush@tpu.ru

Authors details

Mikhail I. Batyuk, Junior Scientist, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mb110@yandex.ru

Bogdan S. Vodnev, Research Engineer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, bvodnev97@gmail.com

Sergey V. Korobkov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, korobkov_1973@mail.ru

Aleksey I. Gnyrya, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, tsp_tgasu@mail.ru

Vasily Ya. Ushakov, DSc, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, vyush@tpu.ru