

УДК 691.328:666.015.45

DOI:10.25686/2542-114X.2019.3.111

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ МАССИВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРОПРОГРЕВА

**С. В. Федосов¹, А. М. Соколов¹, Ю. А. Минаков²,
С. Н. Анисимов², В. А. Поляков³**

¹Ивановский государственный политехнический университет (г. Иваново)

²Поволжский государственный технологический университет (г. Йошкар-Ола)

³Холдинг КСК (г. Иваново)

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в последние годы, показали высокую эффективность электротепловой обработки железобетонных изделий электродным методом токами повышенной частоты (10-20 кГц) с помощью источников питания нового поколения, выполненных на основе транзисторных преобразователей большой мощности. Однако такой технологический процесс достаточно трудно применить при изготовлении массивных густоармированных изделий. В этом случае возможным вариантом реализации тепловой обработки может стать поверхностный электропрогрев стальной опалубки изделия индукционным методом. Предварительную оценку основных характеристик такого способа тепловой обработки удобно производить на примере объекта простой формы в виде параллелепипеда. Важнейшими показателями тепловой обработки являются характеристики температурного поля (распределение температуры и градиента температуры) в объеме материала. При этом необходимо учитывать пределы изменения толщины изделий на практике, которые соответствуют диапазону $0,3 \div 1,2$ м при изменении модуля поверхности от 20 до 5 м^2 . Изучение характеристик температурного поля удобно выполнять посредством решения дифференциального уравнения одномерного теплопереноса вычислительными средствами среды Mathcad (вычислительный блок Given-Pdsolve).

В статье сформулированы и обоснованы краевые и начальные условия решения дифференциального уравнения теплопереноса. Также представлены результаты расчета в виде зависимостей изменения температуры по толщине изделия в различные моменты времени процесса электротепловой обработки изделия с помощью поверхностного электропрогрева. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что поверхностный электропрогрев токами повышенной частоты индукционным методом вполне пригоден и удобен для тепловой обработки практически любых железобетонных изделий, и необходимо продолжение научно-технических разработок по этой тематике в целях создания и пробной эксплуатации опытно-промышленных установок такого типа.

Ключевые слова: железобетон; электротепловая обработка; преобразователь напряжения; повышенная частота; температурное поле; теплоперенос; поверхностный электропрогрев.

Введение. Исследования последних нескольких лет убедительно доказывают преимущества и целесообразность широкого применения электротепловой (электротермической) обработки (ЭТО) железобетонных изделий токами повышенной частоты электродным методом, т.е. посредством пропускания электрического тока в толще бетона [1]. Такой

способ теплового воздействия на бетон обеспечивает весьма равномерное выделение теплоты по объему изделия и, как следствие, однородное температурное поле в нем, чего невозможно добиться при использовании традиционных методов тепловой обработки (ТВО, обработка продуктами сгорания газа, прогрев опалубки горячей водой) [1-3]. Однако в но-

менклатуре строительной отрасли присутствует большое количество густоармированных железобетонных изделий, модуль поверхности которых колеблется в широких пределах, а их ЭТО электродным методом затруднена. В этом случае возможным вариантом применения электротепловой обработки является поверхностный электропрогрев, например, посредством нагрева стальной опалубки с уложенным в нее бетоном индукционным методом. Это достигается установкой индукторов, например, в виде плоских катушек, на поверхность опалубки и пропусканием через них электрического тока повышенной частоты (10÷20 кГц) от источников питания, выполненных на основе транзисторных преобразователей напряжения большой мощности.

Аналитическое моделирование. Как показано в [1], для того чтобы выявить основные закономерности такого способа теплового воздействия на бетон, необязательно проводить исследования процессов тепловой обработки на примере конкретных изделий, хотя, в конечном итоге, при окончательной разработке технологии изготовления изделия надо будет сделать и это.

Для приближенной оценки можно использовать объект простейшей формы, например, в виде параллелепипеда, как показано на рисунке 1. При этом предполагается, что греющая стальная поверхность располагается на всех боковых поверхностях объекта, в его центре расположено начало осей координат, которые направлены перпендикулярно противоположным граням. На всех гранях параллелепипеда устанавливается теплоизоляция для минимизации потерь теплоты в окружающую среду (на рис. 1 не указана). Анализ применяемых в настоящее время железобетонных изделий показывает, что длина ребра $2d$ (рис. 1), соответствующая толщине изделия, на практике колеблется в пределах от 0,3 м до 1,2 м. Это соответствует изменению модуля поверхности M_{II} изделия в достаточно широких пределах: от 20 до 5 м⁻¹.

Согласно предложенной ранее методологии [1] ключевое место при разработке и при-

менении процессов ЭТО принадлежит исследованию характеристик температурных полей в целях определения рациональных режимов таких процессов. Однако точный расчет нестационарных температурных полей даже в простых случаях (см. рис. 1) представляет собой сложную задачу, которая решается посредством применения сложных численных методов, требующих от пользователя специальной подготовки, больших затрат сил и времени [4].

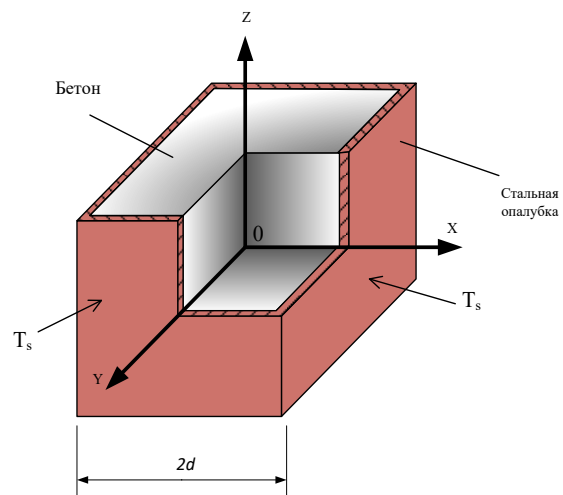


Рисунок 1. Объект для тепловой обработки с помощью поверхностного электропрогрева

С другой стороны, в случае рассматриваемого объекта картина температурного поля будет симметрична во всех направлениях относительно осей, и можно предположить, что она будет одинаковой в направлении каждой из осей в пределах размеров объекта (рис. 1). Это дает основание полагать, что характеристики нестационарного поля в рассматриваемой конструкции можно изучать на основе определения распределения температуры вдоль оси x в различные моменты времени, а для любой точки этой оси будут справедливы следующие соотношения:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad (1) \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

В результате нестационарное температурное поле вдоль этой оси будет описываться одномерным уравнением теплопереноса [1, 3]

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где T – температура ($T = f(x, y, z, t)$), К;
 t – время, с; $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); c – удельная теплоёмкость материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³.

На практике обычно все элементы объекта (см. рис. 1) имеют перед началом электро-тепловой обработки одинаковую температуру, равную температуре окружающей среды T_0 . Поэтому краевые и начальные условия решения дифференциального уравнения (3) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} T_1(-d/2, 0) = T_1(d/2, 0) = T_1(x, 0) = T_{нач} = T_0; \\ T_1(-d/2, t) = T_1(d/2, t) = T_s = v_s t + T_{нач}, \end{aligned} \quad (4)$$

где v_s – скорость нарастания температуры на поверхности бетона при линейном законе ее увеличения; для предварительных оценок целесообразно принять $v_s = 10$ °C/ч при конеч-

ном значении температуры, равном температуре изотермической выдержки $T_k = T_{изот} = 50$ °C и $T_0 = 10$ °C, что соответствует наиболее тяжелым (зимним) температурным условиям изготовления изделий на предприятиях сборного железобетона.

Интерпретация результатов исследования. Ранее выполненные оценки показали, что весьма удобным инструментом решения уравнения (3) и получения искомой функции $T(x, t)$ зависимости температуры от координаты x и времени t является вычислительный блок Given-Pdsolve в среде Mathcad [5].

На рисунке 2 представлены расчетные зависимости изменения температуры вдоль оси x в различные моменты времени электро-тепловой обработки при различных значениях параметра $2d$ при длительности стадии нагревания $\Delta t_{нагр} = 4$ ч и длительности стадии изотермической выдержки $\Delta t_{изот} = 6 \div 72$ ч.

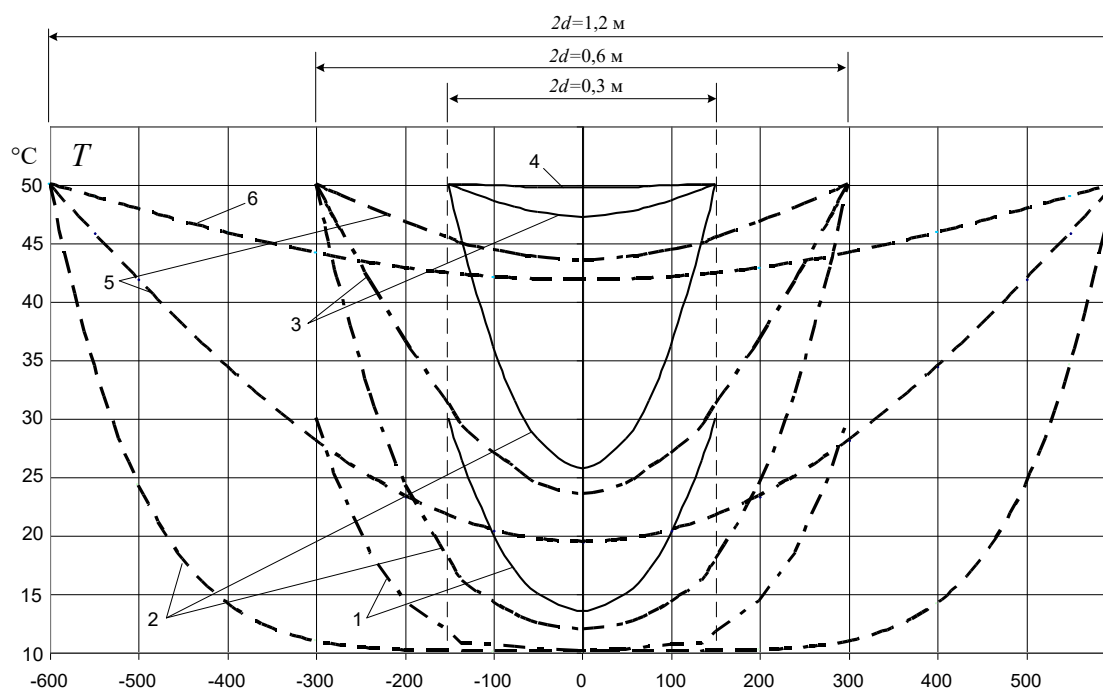


Рисунок 2. Изменение (распределение) температуры вдоль оси x в различные моменты времени t поверхностного электропрогрева (рис. 1): 1 – $t = \Delta t_{нагр} / 2 = 2$ ч; 2 – $t = \Delta t_{нагр} = 4$ ч; 3 – $t = \Delta t_{нагр} + \Delta t_{изот} = 10$ ч ($\Delta t_{изот} = 6$ ч); 4 – $t = 16$ ч ($\Delta t_{изот} = 12$ ч); 5 – $t = 24$ ч ($\Delta t_{изот} = 20$ ч); 6 – $t = 76$ ч ($\Delta t_{изот} = 72$ ч); сплошные линии – $2d = 0,3$ м; штрихпунктирные линии – $2d = 0,6$ м; пунктирные линии – $2d = 1,2$ м

Зависимости, приведенные на рисунке 2, свидетельствуют о весьма сильном влиянии толщины изделия на процесс его разогрева.

Например, при $2d = 0,3$ м полный прогрев изделия наступает при длительности тепловой обработки $t = 16$ ч ($\Delta t_{изот} = 12$ ч), а при вдвое

большей толщине изделия $2d = 0,3$ м добиться такого же прогрева не удастся даже при длительности обработки $t = 24$ ч ($\Delta t_{изот} = 20$ ч).

С другой стороны, эти зависимости (см. рис. 2) показывают, что даже в случае массивных изделий можно обеспечить их прогрев с помощью поверхностных нагревателей посредством выбора соответствующих параметров процесса тепловой обработки. Кроме этого, благодаря гибкости в управлении электротепловой обработкой существует возможность разработки и применения новых режимов такой обработки, позволяющих форсировать разогрев обрабатываемого изделия.

Следует отметить, что при использовании традиционной тепловлажностной обработки (ТВО) отсутствуют гибкость в управлении процессом, возможность управления и минимизации бесполезных потерь энергии, а продолжительность ТВО в силу ряда причин не превышает $10\div 12$ ч, чего явно недостаточно.

Другой важной проблемой достоверного исследования температурных полей в ходе тепловой обработки является учет тепла гидратации цемента, чего в настоящее время пока сделать не удастся. При достаточно больших размерах изделий $2d \geq 0,5$ м этот фактор может оказывать заметное влияние [2].

Выводы

1. Поверхностный электропрогрев, например, индукционным методом токами повышенной частоты, вполне целесообразен и пригоден для тепловой обработки практически всех железобетонных изделий, встречающихся на практике (особенно густоармированных).

2. Необходимо продолжение исследований в данном направлении в целях создания и применения опытно-промышленных установок для тепловой обработки железобетонных изделий с помощью поверхностного разогрева токами повышенной частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосов С. В., Бобылев В. И., Соколов А. М. Электротепловая обработка бетона токами повышенной частоты на предприятиях сборного бетона: монография. Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, ИВГПУ, 2016. 336 с.
2. Железобетонные и каменные конструкции / В. М. Бондаренко, Р. О. Бакиров и др.; под ред. В. М. Бондаренко. Москва: Высшая школа, 2007. 887 с.
3. Федосов С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии: монография. Иваново: ПрессСто, 2010. 364 с.
4. Sidorov V. N., Matskevich S. M. Discrete-analytic solution of unsteady-state heat conduction transfer problem based on a theory of matrix function // Procedia Engineering. Vol. 111. 2015. Pp. 726-733.
5. Федосов С. В., Кузнецов А. Н., Соколов А. М. Методика расчётной оценки характеристик температурных полей в объёме материала при автоклавной обработке ячеистых бетонов // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК): сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием). ИВГПУ. Иваново. 2015. С. 258-260.

Информация об авторах

ФЕДОСОВ Сергей Викторович – академик РААСН, доктор технических наук, профессор, советник при ректорате и заведующий кафедрой техносферной безопасности Ивановского государственного политехнического университета. Область научных интересов – научные основы разработки процессов, технологии и оборудования для термической обработки строительных материалов. Автор более 400 научных и методических трудов, в том числе 16 монографий и 10 учебных пособий. E-mail: prezident@ivgpu.com.

СОКОЛОВ Александр Михайлович – доктор технических наук, доцент Ивановского государственного политехнического университета. Область научных интересов – электротехнологические процессы и установки в строительной и других отраслях народного хозяйства,

силовая электроника, полупроводниковая преобразовательная техника, техника высоких напряжений. Автор более 50 научных и методических трудов. E-mail: alex2010fn@yandex.ru.

МИНАКОВ Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры строительных технологий и автомобильных дорог, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Автор около 300 научных работ и публикаций, заслуженный строитель МАССР, заслуженный строитель РФ, почетный строитель РФ, дважды лауреат государственной премии МАССР. Область научных интересов – монолитное строительство в экстремальных условиях. E-mail: MinakovYA@volgatech.net.

АНИСИМОВ Сергей Николаевич – аспирант, доцент Поволжского государственного технологического университета. Область научных интересов – монолитное строительство в зимних условиях с применением электрообогрева. E-mail: AnisimovSN@volgatech.net.

ПОЛЯКОВ Всеволод Анатольевич – инженер комбината строительных конструкций, г. Иваново. Область научных интересов – монолитное строительство в экстремальных условиях, технология и оборудование для термической обработки строительных материалов.

UDC 691.328:666.015.45
DOI:10.25686/2542-114X.2019.3.111

EVALUATION OF TEMPERATURE FIELD CHARACTERISTICS UNDER HEAT PROCESSING OF REINFORCED CONCRETE PRODUCTS BY MEANS OF SURFACE ELECTRIC HEATING

C. V. Fedosov¹, A. M. Sokolov¹, Iu. A. Minakov², C. N. Anisimov², V. A. Poliakov³

¹*Ivanovo State Polytechnic University (Ivanovo)*

²*Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola)*

³*Building Constructions Plant (Ivanovo)*

The results of the most recent theoretical and experimental studies have proved high effectiveness of electrothermal treatment of concrete products by electrode currents of high frequency (10-20 kHz) using a new generation of power sources, made on the basis of transistor converters of high power. However, this process is difficult to apply in the manufacture of massive densely reinforced items. For this being the case one of the possible options for heat treatment can be surface electric heating of steel formwork of the product using induction method. Preliminary assessment of the main characteristics of this method is convenient to test on a simple object in the form of a parallelepiped. The most important indicators of heat treatment are the characteristics of the temperature field (temperature distribution and temperature gradient) throughout the material. In this case, it is necessary to take into account the range of item thickness, which varies between 0,3 m and 1,2 m when changing the surface modulus from 20 to 5 m⁻¹. The characteristics of the temperature field are convenient to examine by solving the differential equation of one-dimensional heat transfer by Mathcad (computing unit Given-Pdsolve).

The article formulates and justifies the boundary and initial conditions for solving the differential heat transfer equation. Moreover, it provides the results of calculation in the form of dependences of temperature changes in the thickness of the product at different times of the process of electrothermal treatment of the product with the help of surface electric heating. The obtained results make it possible to conclude that the surface electric heating with high-frequency currents by induction method is quite suitable and convenient for heat treatment of nearly any concrete product. However, more research is required in this field on order to develop and test relevant pilot production units.

Keywords: reinforced concrete; electrothermal treatment; voltage converter; increased frequency; temperature field; heat transfer; surface electric heating.

REFERENCES

1. Fedosov S. V., Bobylev V. I., Sokolov A. M. Elektroteplovaja obrabotka betona tokami povyshennoj chastoty na predpriyatijah sbornogo betona: monografija [Electrothermal processing of concrete with high-frequency currents on the enterprises of precast concrete: monograph], Ivanovo, IGEU, IVSPU, 2016, 336 p.
2. V. M. Bondarenko, R. O. Bakirov et al. Zhelezobetonnye i kamennye konstrukcii [Reinforced concrete and stone structures], edited by V. M. Bondarenko, Moscow, Vysshaja shkola [Higher School], 2007, 887 p.
3. Fedosov S. V. Teplomassoperenos v tehnologicheskikh processah stroitel'noj industrii: monografija [Heat and mass transfer in technological processes of the construction industry: monograph]. Ivanovo, PressSto, 2010, 364 p.
4. Sidorov V. N., Matskevich S. M. Discrete-analytic solution of unsteady-state heat conduction transfer problem based on a theory of matrix function, *Procedia Engineering*, vol. 111, 2015, pp. 726-733.
5. Fedosov S. V., Kuznecov A. N., Sokolov A. M. Metodika raschjotnoj ocenki harakteristik temperaturnyh polej v objome materiala pri avtoklavnoj obrabotke jacheistyh betonov [Method of calculating the characteristics of temperature fields in the volume of material during autoclave processing of cellular concrete], *Molodye uchenye – razvitiu tekstil'no-promyshlennogo klastera (POISK): sbornik materialov mezhvuzovskoj nauchno-tehnicheskoi konferencii aspirantov i studentov (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Young scientists – development of textile-industrial cluster (SEARCH): proceedings of the interuniversity scientific and technical conference of post-graduates and students (with international participation)], IVGPU, Ivanovo, 2015, pp. 258-260.

Information about the authors

FEDOSOV Sergei Viktorovich – Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Advisor to the rector and Head of the Department of Technosphere Safety of Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo. Research interests – scientific bases of processes development, technology and equipment for heat treatment of building materials. Author of over 400 publications, including 16 monographs and more than 10 student manuals. E-mail: prezident@ivgpu.com.

SOKOLOV Aleksandr Mikhailovich – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor of Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo. Research interests – electro-technological processes and installations in the construction and other sectors of the economy, power electronics, semiconductor, converter technology, high voltage technology. Author of more than 50 publications. E-mail: alex2010fn@yandex.ru.

MINAKOV Iurii Aleksandrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction Technology and Roads, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – monolithic construction under extreme conditions. Author of about 300 scientific publications. Honorary Builder of the MASSR, Honorary Builder of Russia, Honorary Builder of the Russian Federation, Laureate of the state prize of MASSR. E-mail: MinakovYA@volgatech.net.

ANISIMOV Sergei Nikolaevich – Postgraduate student, Associate Professor of Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – monolithic construction in winter conditions with the use of electric heating. E-mail: AnisimovSN@volgatech.net

POLIAKOV Vsevolod Anatolevich – Engineer of Building Constructions Plant, Ivanovo. Research interests – monolithic construction in extreme conditions, technology and equipment for heat treatment of building materials.

Библиографическая ссылка

Оценка характеристик температурного поля при тепловой обработке массивных железобетонных изделий с помощью поверхностного электропрогрева / С. В. Федосов, А. М. Соколов, Ю. А. Минаков, С. Н. Анисимов, В. А. Поляков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 3(11). – С. 111-116. – DOI:10.25686/2542-114X.2019.3.111