УДК 691.328:666.015.45

© С. В. Федосов, д-р техн. наук, академик РААСН
(Ивановский государственный политехнический университет)

© С. Н. Анисимов, старший преподаватель
(Поволжский государственный технологический университет)

© А. М. Соколов, д-р техн. наук, доцент
(Ивановский государственный политехнический университет)
E-mail: alex2010fn@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-2-35-42

© S. V. Fedosov, Dr. Sci. Tech., Academician of RAACS
(Ivanovo State Polytechnic University)

© S. N. Anisimov, senior teacher
(Volga State University of Technology)

© A. M. Sokolov, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
(Ivanovo State Polytechnic University)
E-mail: alex2010fn@yandex.ru

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ НАРУЖНОМ ЭЛЕКТРОПРОГРЕВЕ ШТЕПСЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ (Часть 1)

METHODS OF RESEARCHING THE NON-STATIONARY TEMPERATURE FIELD AT EXTERNAL ELECTRICAL HEATING OF PLUG CONNECTIONS IN REINFORCED CONCRETE COLUMNS OF PRECAST-MONOLITHIC STRUCTURES (Part 1)

Обязательный элемент технологии сборно-монолитного строительства при низких температурах — наружный электропрогрев узлов соединения железобетонных конструкций, наиболее распространены из которых штепсельные соединения железобетонных колонн. Для квалифицированного выполнения электропрогрева необходимо тщательное исследование характеристик температурных полей в объеме материала железобетонных изделий в ходе такой тепловой обработки. Знание этих характеристик позволяет оценивать условия твердения свежего самоуплотняющегося бетона, укладываемого в штепсельный стык, и опасность повреждения материала под действием внутренних напряжений, вызванных наличием градиентов температуры вследствие возникающей неоднородности температурного поля, а также обоснованно выбирать параметры процесса электротепловой обработки (ЭТО). Эти характеристики обычно определяют сложными численными расчетными методами. Разработана достаточно простая методика расчета и анализа характеристик нестационарного температурного поля при ЭТО штепсельного стыка, использующая возможности вычислительной среды Mathcad, и представлен пример ее применения.

Ключевые слова: железобетонное изделие, сборно-монолитная конструкция, электротепловая (электротермическая) обработка, наружный электрообогрев, теплоперенос, температурное поле, штепсельное соединение, градиент температурного поля.

An obligatory element of the precast-monolithic construction technology at low temperatures is the external electric heating of the reinforced concrete structure joints, the most common of which are plug connections of reinforced concrete columns. For qualified performance of electro-thermal treatment processes, it is necessary to carefully study the characteristics of the temperature fields in the volume of the material of reinforced concrete products during such heat treatment. The knowledge of such characteristics allows estimating the conditions of fresh self-compacting concrete hardening laid in the plug joint and forecasting the risk of damage to the material under the influence of internal stresses caused by the presence of temperature gradients due to the inevitable heterogeneity of the temperature field, as well as to reasonably choosing the process parameters of electro-thermal treatment (ETT). These characteristics are usually determined by complex numerical methods. A fairly simple method of calculation and analysis of the characteristics of the non-stationary temperature field at ETT of a plug joint has been developed using the capabilities of the MathCAD computing environment, and an example of its application is shown.

Keywords: reinforced concrete product; precast-monolithic construction; electro-thermal treatment (ETT); external electric heating; heat transfer; temperature field; plug connection; temperature field gradient.

Обязательной составной частью прогрессивного технологического процесса возведения сборно-монолитных железобетонных конструкций является электротепловая обработка узлов соединения их элементов. К числу наиболее ответственных узлов следует отнести штепсельное соединение железобетонных колонн, а основным способом их тепловой обработки является наружный электрообогрев [1, 2].

Для разработки и применения процессов электротепловой обработки железобетонных изделий необходимо знание характеристик температурного поля в объеме материала [3]. Такие сведения позволяют прогнозировать рост механической прочности бетона в штепсельном стыке и сроки достижения этим показателем нормативных значений, т. е. готовности штепсельного соединения к дальнейшей эксплуатации. Другое важное применение известности таких характеристик — оценка опасности повреждения материала внутренними механическими напряжениями, вызванными градиентами температуры в его объеме, неизбежно возникающими в ходе тепловой обработки, а также устранение, при необходимости, этой опасности.

Основным способом определения характеристик температурного поля в объеме материала является решение дифференциального уравнения теплопереноса в трехмерном пространстве [3, 4]

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T(x, y, z, t), \quad (1)$$

где T — температура ($T = f(x, y, z, t)$), К; t — время, с; ∇^2 — оператор Лапласа; $a = \lambda / (c\rho)$ — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; λ — коэффициент теплопроводности материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; c — удельная теплоемкость материала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; ρ — плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Как известно, решение уравнения (1) с учетом граничных условий представляет собой сложную задачу и обычно осуществляется при помощи численных методов, требующих от специалиста соответствующих знаний, специальной подготовки и большого объема работы по программированию и отладке вычислений [5, 6]. Причем наиболее сложным является расчет нестационарных температурных полей, возникающих на стадии нагревания материала до момента достижения стационарных значений температу-

ры во всех точках его объема. Поэтому весьма актуальна задача разработки таких инженерных методов исследования характеристик температурных полей в объеме обрабатываемых железобетонных изделий, которые будут доступны широкому кругу специалистов.

Процесс тепловой обработки штепсельного соединения с помощью наружного электрообогрева иллюстрирует рис. 1. В процессе электротепловой обработки тепловые потоки от нагревателей, расположенных на противоположных поверхностях железобетонных колонн перпендикулярно оси x , распространяются по направлению этой оси вглубь материала. Одновременно часть этих потоков ответвляется в обе стороны вдоль осей y и z . Однако на пути тепловых потоков вдоль оси y существует преграда в виде слоя теплоизоляции на поверхности колонн, перпендикулярных этой оси, а сопротивление распространения тепловому потоку сквозь слой теплоизоляции, как показывают количественные оценки, больше, чем сопротивление тепловому потоку в толще бетона, как минимум, в 45–55 раз [3]. С другой стороны, картина температурного поля будет симметрична во всех направлениях относительно оси x , и можно предположить, что она будет одинаковой в направлении прямой, параллельной оси x , при изменении значений координат y и z в пределах размеров нагревателей (см. 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:

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

В результате уравнение (1) упрощается и приобретает вид

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

Таким образом, исследование нестационарного температурного поля в рассматриваемой конструкции (см. рис. 1) сводится к решению одномерного уравнения теплопереноса (3), а расчетная схема будет выглядеть, как показано на рис. 2. Особенностью этой схемы является то, что она учитывает неплотное прилегание поверхно-

Рис. 1. Схема наружного электропрогрева штепсельного соединения железобетонных колонн

сти нагревателя (алюминиевого листа) к поверхности бетона из-за ее шероховатости введением воздушной прослойки эквивалентной толщины $H_{\text{в}}$ (см. рис. 2), которую следует принять равной половине полной высоты профиля поверхности H_{max}^1 :

$$H_{\text{в}} = H_{\text{max}} / 2. \quad (4)$$

Как показали ранее выполненные оценки, весьма удобным инструментом решения уравнения (3) является вычислительный блок Given-Pdesolve в среде Mathcad [7, 8]. При использовании этого вычислительного блока после слова Given вводится уравнение (3) с применением обозначений, принятых в Mathcad. Например, функция $T(x, t)$ в уравнении (3) обозначается как $u(x, t)$. Задаются начальные и краевые условия — не только численными значениями, но и как функции переменных x и t , что предоставляет значительные удобства в пользовании вычислительным блоком и существенно расширяет его возможности.

Затем указывается имя встроенной функции в следующем виде:

$$Pdesolve(u, x, xrange, t, trange, [xpts], [tpts]), \quad (5)$$

где u — искомая величина, т. е. значение температуры; x — пространственная координата (см. рис. 1); $xrange$ — интервал решения по пространственной координате, который в рассматриваемом случае равен расстоянию вдоль оси x между поверхностью нагревателей (см. рис. 1), т. е. соответствующему размеру сечения железобетонной колонны (обычно на практике $xrange = d = 40$ или 30 см); t — координата по времени; $trange$ — интервал решения по времени, порядок выбора его величины будет описан ниже; $xpts$ и $tpts$ — количество точек дискретизации по пространственной координате и по времени, их задавать необязательно, так как вычислительный блок сам выбирает оптимальные значения этих параметров.

Результатом вычислений является функция $u(x, t)$, которая позволяет определять значение температуры $T(x, t) = u(x, t)$ в любой момент времени t и при любом значении координаты x в пределах от 0 до $trange$ и $xrange$ соответственно. Эту функцию можно представить графически средствами отображения Mathcad, можно также в матричной форме скопировать в другую программную среду (например Excel, Matlab) для дальнейшей обработки и представления результатов.

Как показал предварительный опыт [8] применения вычислительного блока Given-Pdesolve, расчеты целесообразно выполнять в несколько этапов, каждый из которых отличается условиями теплового воздействия на объект. В рассматриваемом случае (см. рис. 1), по-видимому, достаточно выделить два этапа: первый из них соответствует периоду времени изменения температуры нагревателя $T_{\text{н}}$ от начального значения $T_{\text{нач}}$ до конечного $T_{\text{к}}$, второй — периоду изотермической выдержки, когда температура нагревателя остается неизменной $T_{\text{к}} = T_{\text{изот}} = \text{const}$. При этом интервалы решения по времени будут иметь для каждого этапа следующие значения:

$$\begin{aligned} \text{этап 1: } trange &\geq \Delta t_{\text{нагр}}; \\ \text{этап 2: } trange &\geq \Delta t_{\text{изот}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Delta t_{\text{нагр}}$ и $\Delta t_{\text{изот}}$ — длительность стадии нагревания и изотермической выдержки соответственно.

¹ ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

Рис. 2. Реальная картина контактирования нагревателя с поверхностью бетона (а) и расчетная схема (б):
1 — железобетонная колонна; 2 — дюралюминиевый щит; 3 — герметик; 4 — нихромовый провод; 5 — стеклоткань;
6 — теплоизоляция; 7 — воздушная прослойка, эквивалентная зазору реального профиля (а); T_f , T_{gr} , T_a — температура
поверхности обогреваемого бетона, нагревателя и дюралюминиевого листа; H_f , H_{gr} , $H_{ст}$, H_n — толщина воздушной
прослойки, листа дюралюминия, стеклоткани и нихрома с герметиком, соответственно; H_{max} — полная высота профиля

В подавляющем большинстве случаев соединяемые колонны и нагреватели, установленные на их поверхность, имеют перед началом электротепловой обработки одинаковую температуру, равную температуре окружающей среды T_0 . Поэтому краевые и начальные условия решения дифференциального уравнения (3) на этапе 1 можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} T_1(-d/2, 0) = T_1(d/2, 0) = T_1(x, 0) = T_{\text{нач}} = T_0; \\ T_1(-d/2, t) = T_1(d/2, t) = T_s = v_s t + T_{\text{нач}}, \quad (7) \end{aligned}$$

В результате решения уравнения (3) с учетом (7) определяется распределение (т. е. ее изменение) температуры вдоль оси x для любого момента времени в пределах $0 \leq t \leq \Delta t_{\text{нагр}}$, в том числе для $t = \Delta t_{\text{нагр}}$ — момента окончания стадии нагрева, т. е. вычислений этапа 1:

$$T_1(x, \Delta t_{\text{нагр}}) = u(x, t). \quad (8)$$

Эта функция (8) фактически является формулировкой начальных условий для вычислений этапа 2:

$$T_2(x, 0) = T_1(x, \Delta t_{\text{нагр}}). \quad (9)$$

При этом функция (9) должна быть обязательно выражена в аналитической форме. Однако особенностью вычислительного блока `GivenPdesolve` является то, что искомая функция $u(x, t)$ может быть представлена либо в графическом виде, либо численном или матричном и не имеет аналитического выражения. Преодолеть это затруднение можно применением для описания функции (9) полинома n -й степени:

$$T_2(x, 0) = T_1(x, \Delta t_{\text{нагр}}) = A_n x^n + A_{n-1} x^{n-1} + \dots + A_2 x^2 + A_1 x + A_0, \quad (10)$$

где коэффициенты $A_n \dots A_0$ — действительные числа.

Для определения $A_n \dots A_0$ конечное распределение температуры $T_1(x, \Delta t_{\text{нагр}})$ выражается в виде массива значений

$$T_1(x, \Delta t_{\text{нагр}}) = T_1[x_i, \Delta t_{\text{нагр}}], \quad (11)$$

где x_i — дискретные значения координаты (т. е. еще один массив) x при изменении ее от 0 до d с определенным шагом (необязательно одинаковым).

Затем эти массивы используются как исходные сведения для функций *regress* (X, Y, n) и *Corr* ($Y, y(x)$) среды Mathcad, которые производят вычисление значений $A_n \dots A_0$ для полинома заданной степени n и коэффициента корреляции (r_k^2) исходной функции и ее описания с помощью полинома.

Указанные массивы x_i и $T_1[x_i, \Delta t_{\text{нагр}}]$ можно скопировать в другую вычислительную среду (Excel, Matlab) и, используя ее средства, определить искомые величины ($A_n \dots A_0, r_k^2$). При этом весьма удобной является среда Excel, так как она позволяет не только быстро выполнить вычисления, но также графически представить исходную и аппроксимирующую функцию для визуального сравнения и анализа. Ее недостатком является наличие предельного значения степени полинома $n = 6$, чего, впрочем, в большинстве практических случаев вполне достаточно.

Для выполнения расчетов на этапе 2, кроме начального распределения (10) температуры вдоль оси x , необходимо определить краевые условия, т. е. величину или характер изменения температуры на поверхности объекта (см. рис. 1) аналогично соотношениям (7) для этапа 1. Это можно сделать, полагая, что после завершения стадии нагревания температура нагревателя остается неизменной во времени:

$$T_n = T_{\text{изот}} = \text{const}. \quad (12)$$

Однако из анализа рис. 2 нетрудно сделать вывод, что в элементах (слоях) нагревателя будет возникать свое распределение температуры, и ее значение на поверхности объекта T_s , определяющее граничные условия при использовании вычислительного блока Given-Pdesolve, будет отличаться от температуры в нагревателе:

$$T_n \geq T_s = T_2(0, t) = T_2(d, t). \quad (13)$$

Связь между этими параметрами можно установить из предположения, что температура в слое, где располагается нихромовый провод с электрическим током в толще герметика (H_n на рис. 2) и где выделяется тепло, во всех точках имеет одинаковое значение, равное T_n . Следовательно, плотность теплового потока p_s , исходящего от этого слоя, будет иметь одинаковую

величину во всех остальных слоях нагревателя, по всей его поверхности и на поверхности обрабатываемого изделия. На всем пути теплового потока и в поверхностном слое обрабатываемого изделия вдоль оси x справедливо соотношение [3, 4]

$$p_s = -\lambda_i \frac{dT_i}{dx}, \quad (14)$$

где λ_i — коэффициент теплопроводности материала соответствующего слоя, dT_i/dx — градиент температуры в этом слое.

Как показано в [3, 4], в результате интегрирования выражения (14) с учетом рис. 2 получается формула

$$\begin{aligned} T_s &= T_n - p_s \left(\frac{H_b}{\lambda_b} + \frac{H_a}{\lambda_a} + \frac{H_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} \right) \approx \\ &\approx T_n - p_s \left(\frac{H_b}{\lambda_b} + \frac{H_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} \right), \end{aligned} \quad (15)$$

которая устанавливает связь между упомянутыми выше значениями температуры, где $\lambda_b, \lambda_a, \lambda_{\text{ст}}$ — коэффициент теплопроводности соответствующих материалов (см. рис. 2), $\lambda_a \gg \lambda_b$ и $\lambda_a \gg \lambda_{\text{ст}}$.

Соотношение (15) также необходимо использовать и при вычислениях на этапе 1. Однако для использования этой формулы (15) требуется знание величины плотности теплового потока p_s , которая может быть определена лишь после решения уравнения (3). Причем, к сожалению, вычислительный блок Given-Pdesolve не выдает результата в виде первой производной искомой функции $u(x, t)$ по какому-либо аргументу, чтобы можно было воспользоваться формулой (14). В таком случае можно прибегнуть к численной оценке:

$$\begin{aligned} p_s &= -\lambda_6 \left(\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right)_{x=0} = -\lambda_6 \text{grad } T(0, t) \approx \\ &\approx -\lambda_6 \frac{T(0, t) - T(\delta, t)}{\delta} = -\lambda_6 \frac{u(0, t) - u(\delta, t)}{\delta}, \end{aligned} \quad (16)$$

где δ — толщина тонкого поверхностного слоя бетона, в пределах которого градиент температуры можно принять постоянным и равным градиенту $\text{grad } T(0, t)$ на поверхности бетона ($x = 0$); λ_6 — коэффициент теплопроводности бетона. Варьированием величины δ можно добиться достаточно высокой точности определения p_s по формуле (16): предварительные оценки пока-

ли, что на практике целесообразно использовать $\delta \leq 0,1$ мм, так как погрешность вычислений составляет не более 0,0001 %.

Вычисления на этапе 2 выполняются точно так же, как на этапе 1, только после слова Given указываются начальные и граничные условия согласно (10) и (13) с учетом (12), (15) и (16). Затем указывается имя встроенной функции (5) с учетом (6), а результатом также является функция $u(x, t)$.

Из приведенного описания предлагаемой расчетной методики нетрудно увидеть, что из-за неопределенностей с заданием начальных и граничных условий вычисления с помощью вычислительного блока Given-Pdsolve приходится организовывать в форме итерационных процессов. Причем в качестве их варьируемого параметра можно использовать значение температуры, координату, момент времени, плотность теплового потока и др., в зависимости от конкретной задачи расчетов и предпочтений пользователя.

Для проверки и примера использования предложенной методики были выполнены расчеты распределения температуры вдоль оси x в конструкции (см. рис. 1) при условиях:

этап 1: $T_n = v_n t + T_{нач}$ при $0 \leq t \leq \Delta t_{нагр}$,
этап 2: $T_n = T_{изот} = \text{const}$ при $\Delta t_{нагр} \leq t \leq \Delta t_{изот}$ (17)
при различных значениях скорости подъема температуры в нагревателе v_n .

На рис. 3 представлены результаты этих расчетов в виде кривых распределения температуры (т. е. ее изменения) вдоль оси x в различные моменты времени. Причем это распределение температуры показано не только в объеме материала (бетона), но и в области контакта поверхности нагревателя с бетоном, а также в слоях нагревателя с помощью растянутой для наглядности шкалы вдоль оси x .

Из рис. 3 нетрудно сделать вывод, что в процессе прогрева бетона температура на его поверхности T_s существенно отличается от температуры нагревателя T_n : увеличение T_s суще-

Рис. 3. Изменение (распределение) температуры вдоль оси x в различные моменты времени t поверхностного электропрогрева (см. рис. 1) при скорости подъема температуры в нагревателе $v_n = 110$ °C/ч (сплошные линии) и $v_n = 10$ °C/ч (пунктирные линии): 1 — $t = \Delta t_{нагр}/2$; 2 — $t = \Delta t_{нагр}$; 3 — $t = \Delta t_{нагр} + 4$ ч; 4 — $t = \Delta t_{нагр} + 24$ ч; $T_o = 0$ °C; $T_{изот} = 40$ °C; $x_{шт}$ — координата оси штепсельного стыка; $H_v = 0,05$ мм

ственно отстает от роста T_n . При этом максимальная разность — около $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ (примерно 30 % от $T_{\text{изот}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) — между этими величинами достигается в момент окончания стадии нагревания (кривые 2 на рис. 3). Характерно, что причина такого явления — это наличие тонкой воздушной прослойки H_b (см. рис. 2).

На протяжении всего периода разогрева материала железобетонной колонны наблюдается весьма неоднородное температурное поле в его объеме. При этом уменьшение скорости подъема температуры в нагревателе более чем в 10 раз позволяет в момент окончания стадии нагревания уменьшить неоднородность этого поля и повысить температуру в месте расположения штепсельного стыка ($x_{\text{ш}}$) с $\approx 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $\approx 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ (сплошные и пунктирные линии 2). Тем не менее, этот показатель далек от конечного значения $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ по завершении прогрева, который наблюдается после истечения 24 ч с момента окончания стадии нагревания (кривые 4).

Используя результаты вычислений с помощью предложенной методики (см. рис. 3), можно решать различные задачи: получать зависимости температуры и градиента температуры от времени в различных точках конструкции, изучать влияние разных факторов на процесс электротепловой обработки штепсельного соединения и др. в целях оптимизации технологического процесса и оборудования.

Выводы

1. Предложенная методика расчета характеристик температурных полей в объеме железобетонных колонн при получении штепсельных соединений сборно-монолитных конструкций является достаточно простым и удобным инструментом при разработке процессов электротепловой обработки железобетонных изделий, доступным широкому кругу пользователей.

2. Необходимо, используя эту методику, тщательно и всесторонне исследовать характеристики процесса электротепловой обработки рассматриваемой и широко применяемой конструкции (см. рис. 1) в целях выбора рациональных режимов такого процесса.

(Продолжение следует)

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. Бондаренко В. М., Бакиров Р. О., Назаренко В. Г., Римшин В. И. Железобетонные и каменные конструкции / под ред. В. М. Бондаренко. 4-е изд., доп. М.: Высшая школа, 2007. 887 с.
3. Федосов С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК «ПрессСто», 2010. 364 с.
4. Федосов С. В., Бобылев В. И., Соколов А. М. Электротепловая обработка бетона токами повышенной частоты на предприятиях сборного бетона. Иваново: ИГЭУ, ИВГПУ, 2016. 336 с.
5. 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. 2015. Vol. 111. Pp. 726–733.
6. Мацкевич С. М., Сидоров В. Н. Нестационарная задача теплопроводности в операторном виде и ее численно-аналитическое решение // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2014. Vol. 10, Issue 3. Pp. 121–127.
7. Гурский Д. А., Турбина Е. С. Вычисления в Mathcad 12. СПб.: Питер, 2006. 544 с.
8. Федосов С. В., Кузнецов А. Н., Соколов А. М. Методика расчетной оценки характеристик температурных полей в объеме материала при автоклавной обработке ячеистых бетонов // Молодые ученые — развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК): сб. материалов межвуз. науч.-техн. конф. аспирантов и студентов (с международным участием). Иваново: ИВГПУ, 2015. С. 258–260.

References

1. *Rukovodstvo po progrevu betona v monolitnykh konstruktseyakh* [Guidelines for heating of concrete in monolithic structures]. Eds. Krylov B. A., Ambartsumyan S. A., Zvezdov A. I. Moscow, NIIZhB Publ., 2005, 276 p.
2. Bondarenko V. M., Bakirov R. O., Nazarenko V. G., Rimshin V. I. *Zhelezobetonnye i kamennye konstruktzii* [Reinforced concrete and masonry structures]. 4-th ed., revised. Ed. Bondarenko V. M. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007, 887 p.
3. Fedosov S. V. *Teplomassoperenos v tekhnologicheskikh protsessakh stroitel'noy industrii* [Heat-mass transfer in technological processes of the construction industry]. Ivanovo, IPK PressSto Publ., 2010, 364 p.
4. Fedosov S. V., Bobylev V. I., Sokolov A. M. *Ehlektroteplovaya obrabotka betona tokami povyshennoy*

chastoty na predpriyatiyakh sbornogo betona [Electro-thermal processing of concrete with high-frequency currents at enterprises producing precast concrete]. Ivanovo, IGEhU, IVGPU Publ., 2016, 336 p.

5. 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*, 2015, vol. 111, pp. 726–733.

6. Matskevich S. M., Sidorov V. N. *Nestatsionarnaya zadacha teploprovodnosti v operatornom vide i ee chislenno-analiticheskoe reshenie* [Unsteady problem of thermal conductivity in operator form and its numerical-analytical solution]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2014, vol. 10, iss. 3, pp. 121–127.

7. Gurskiy D. A., Turbina E. S. *Vychisleniya v MathCAD 12* [Computations in MathCAD 12]. St. Petersburg, Piter Publ., 2006, 544 p.

8. Fedosov S. V., Kuznetsov A. N., Sokolov A. M. *Metodika raschetnoy otsenki kharakteristik temperaturnykh poley v obeme materiala pri avtoklavnoy obrabotke yacheistyykh betonov* [Method of calculation evaluation of the characteristics of temperature fields in the volume of the material at the autoclave treatment of cellular concrete]. *Trudy mezhvuz. nauch.-tekhn. konf. aspirantov i studentov (s mezhdunarodnym uchastiem) «Molodye uchenye — razvitiyu tekstil'no-promyshlennogo klastera (POISK)»* [Proc. of Int. sci.-tech. conf. of post-graduates and students (with international participation "Young scientists for development of textile-industrial cluster (SEARCH)"]. Ivanovo, IVGPU Publ., 2015, pp. 258–260.