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 10.23968/1999-5571-2019-16-3-20-28

© 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 2)

METHODS OF RESEARCHING THE NON-STATIONARY TEMPERATURE FIELD AT EXTERNAL ELECTRICAL HEATING OF PLUG CONNECTIONS IN REINFORCED CONCRETE COLUMNS OF PRECAST-MONOLITHIC STRUCTURES (Part 2)

В первой части настоящей статьи представлена инженерная методика расчета нестационарного температурного поля при электротепловой обработке (ЭТО) с помощью поверхностного прогрева штепсельных соединений железобетонных колонн в процессе монтажа сооружений с помощью прогрессивной технологии сборно-монолитного строительства [1]. Рассмотренная методика основана на использовании средств вычислительной среды Mathcad, достаточно проста и удобна в применении. Однако, несмотря на приведенный пример применения методики, демонстрирующий ее эффективность, она нуждается в экспериментальном подтверждении. Поэтому был разработан лабораторный макет штепсельного соединения, и с его использованием выполнены эксперименты, подтвердившие достоверность предложенной расчетной методики. Показана возможность этой методики определять не только пространственные характеристики температурного поля, но и временные. С помощью расчетной методики выполнены исследования характеристик температурного поля в процессе ЭТО применительно к реальным условиям, на основе чего разработаны рекомендации по применению ЭТО в сборно-монолитном строительстве.

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

Part 1 of this study presents the engineering method of researching the non-stationary temperature field by means of electro-thermal treatment (ETT) of plug connections in reinforced concrete columns of precast-monolithic structures during the installation using advanced technology of precast-monolithic construction [1]. The presented method of calculation has been developed using the capabilities of the MathCAD computing environment. It is a fairly simple method which is convenient in application. However, despite the presented example of application of the method demonstrating its effectiveness, it needs the experimental confirmation. Therefore, a laboratory model of the plug connection was developed, and experiments were performed with its use, which confirmed the reliability of the proposed calculation method. There has been proved the possibility of this technique to determine not only the spatial characteristics of the temperature field, but also the time ones. With the help of the calculation method, there have been carried out studies of the characteristics of the temperature field in the process of electro-thermal treatment (ETT) in relation to the real conditions, and recommendations for using the ETT in precast-monolithic construction have been developed.

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

В первой части настоящей статьи [1] представлена достаточно простая и удобная методика расчета характеристик нестационарного температурного поля в ходе тепловой обработки штепсельных соединений железобетонных колонн сборно-монолитного строительства с помощью поверхностного электропрогрева, которая основана на использовании вычислительных средств среды Mathcad. Пример ее применения, представленный там же, свидетельствует о том, что она может стать эффективным инструментом при разработке рациональных процессов такой электротепловой обработки в случае, если будет подтверждена ее достоверность.

Для подтверждения достоверности упомянутой выше расчетной методики был выполнен эксперимент в лабораторных условиях. Для этого был изготовлен макет штепсельного стыка железобетонных колонн, в различных точках объема которого были установлены термодатчики для измерения температуры в ходе тепловой обработки, как представлено на рис. 1. Лабораторный макет имеет следующие параметры. Сечение железобетонной колонны составляет 300×300 мм, высота штепсельного соединения — 700 мм, полная высота макета — 1000 мм, диаметр отверстия штепсельного стыка — 45 мм, расстояние от поверхности колонны до штепсельного разъема — 30 мм.

Плоские электронагреватели для поверхностного электропрогрева установлены на две противоположные вертикальные поверхности колонны и имеют высоту 800 мм. Номинальная мощность каждого электронагревателя составляет 6 кВт, а их питание осуществляется от источника, который обеспечивает различные законы изменения температуры нагревателей во времени в автоматическом режиме работы с помощью пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора. Кроме термодатчиков, расположение которых представлено на рис. 1, в составе установки имелись датчики для контроля температуры поверхностных электронагревателей в предположении, что они всегда имеют одинаковую температуру по всей поверхности. На поверхности макета штепсельного соединения железобетонных колонн по всей высоте была установлена теплоизоляция, выполненная из минераловатной плиты с коэффи-

циентом теплопроводности $\lambda_{\text{мв}} = 0,04$ Вт/(м · К) и толщиной 50 мм. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 2.

В процессе эксперимента после подачи напряжения на электронагреватели производилась периодическая регистрация температуры самих нагревателей и в различных точках макета штепсельного соединения (см. рис. 1, 2) через промежутки, длительность которых изменялась от 5 мин (на стадии нагревания) до 4 ч (в конце стадии изотермической выдержки). Общая продолжительность эксперимента составила 9 ч. На рис. 3 представлены экспериментальные и расчетные зависимости температуры от времени,

Рис. 1. Конструкция лабораторного макета штепсельного соединения железобетонных колонн и схема расположения термодатчиков в объеме макета: 1 — термодатчик в середине поперечного сечения колонны верхней части штепсельного соединения на расстоянии 150 мм от верхней торцевой поверхности колонны; 2 — термодатчик в середине сечения колонны средней части соединения; 3 — термодатчик в стыке, заполненном бетонной смесью; 4 — термодатчик в другом стыке, заполненном бетонной смесью; 5 — термодатчик в середине сечения колонны в нижней части соединения на расстоянии 150 мм от нижней торцевой поверхности колонны; 6 — место расположения нагревателей для поверхностного электрообогрева

полученные по результатам опыта и вычислений с использованием предложенной методики [1].

Характерной особенностью температурных зависимостей на рис. 3 является то, что изменение температуры показано не в пространстве, как это было сделано в первой части статьи [1], т. е. вдоль оси x (см. рис. 1), а во времени. Такое представление результатов расчета и эксперимента в некоторых случаях более наглядно и информативно для решения практических вопросов применения электротепловой обработки железобетонных изделий.

Важной особенностью применения расчетной методики [1] при получении расчетных зависимостей на рис. 3 является то, что при вычислениях толщина воздушной прослойки H_v между поверхностью электронагревателя и бетона была принята равной 0,45 мм (см. рис. 2 в [1]). Это значение было получено по результатам измерения фактического зазора между поверхностью электронагревателя и бетоном с помощью набора щупов после завершения подготовки лабораторного макета к проведению эксперимента. Такое значение указанного параметра существенно превышает ту величину, что использовалась в предыдущих расчетах [1] ($H_v = 0,05$ мм, пунктирные линии на рис. 3), которая была получена

на основании анализа ГОСТ 2789–73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики», нормирующего показатели микронеровностей профиля поверхности строительных изделий, и этот вопрос требует, по-видимому, дополнительного изучения в дальнейшем. Еще одним важным аспектом выполнения расчетов является обоснованный выбор значения такого важного параметра, используемого в вычислениях, как коэффициент теплопроводности бетона. Как показывают многочисленные исследования, даже для одного и того же класса бетона наблюдаются заметные колебания этого параметра в зависимости от различных факторов [2–6]. На основании анализа этих литературных сведений, учитывая, что для изготовления железобетонных колонн и опытного макета применяется бетон класса В25 в возрасте более 28 суток, а диапазон изменения температуры в опыте не выходил за рамки 10...60 °С, в расчетах было принято значение этого показателя $\lambda_6 = 1,5$ Вт/(м · К).

Интересной особенностью выполненного эксперимента является не совсем типичный график изменения температуры нагревательных элементов в ходе опыта (т. е. график тепловой обработки, кривая 1 на рис. 3), когда их температура в течение одного часа достигла 60 °С. Затем

Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки при подготовке к эксперименту (а) и в ходе его выполнения (б)

после истечения 2,7 ч температура была снижена до 50 °С и далее оставалась неизменной. Это было сделано, чтобы проверить возможность форсирования процесса прогрева штепсельного соединения посредством управления режимом работы нагревателя в целях ускорения твердения свежего бетона, уложенного в стыке штепсельного соединения. Следует сделать вывод, что расчет на получение необходимого результата полностью оправдался: уже через 3 ч после начала электротепловой обработки температура в месте штепсельного стыка (кривая 3 на рис. 3) уже достигла и превысила 40 °С.

Как показывают расчеты, представленные в первой части статьи [1], если температура нагревателей при изотермической стадии составляет $T_{\text{изот}} = 40$ °С, то температура в месте стыка достигает такого значения лишь спустя 20–22 ч после начала тепловой обработки. Эти результаты лишний раз подтверждают удобство, гибкость и широкие возможности поверхностного электроразогрева в управлении процессом тепловой обработки рассматриваемого объекта по сравнению с традиционными методами. Другой причиной применения такого графика теплового воздействия (кривая 1 на рис. 3) является проверка корректной работы предложенной ме-

тодики расчета [1] в более сложных условиях. Действительно, в первой части статьи [1] расчет предлагается выполнять в два этапа: расчет характеристик температурного поля в пределах стадии нагревания, а затем, используя конечный результат первого этапа в качестве начальных условий, производится расчет этих характеристик в пределах стадии изотермической выдержки. В рассматриваемом случае вычисления пришлось разбить на три этапа, используя тот же принцип: стадия нагревания, затем стадия изотермической выдержки при $T_{\text{изот}} = 60$ °С и стадия изотермической выдержки при $T_{\text{изот}} = 50$ °С. Дополнительным усложнением расчетов является то, что начальная температура нагревателя при $t = 0$ существенно выше температуры бетона, что видно из сравнения кривой 1 и зависимостей 2–4 (см. рис. 3), что было обусловлено особенностями принципа действия автоматизированной системы электропитания нагревателей опытной установки.

Сравнение результатов расчета и эксперимента (зависимости 3 и 4), с учетом погрешности измерения температуры $\pm 2...5$ °С [7], позволяет сделать вывод о полном согласовании результатов расчета и эксперимента, т. е. о достоверности предложенной методики и возможности

Рис. 3. Изменение температуры в различных точках опытной установки во времени:
1 — температура нагревателей (эксперимент); 2 — температура на поверхности бетона в месте расположения электронагревателей (расчет); 3 — температура в месте расположения (на оси, $x_{\text{ш}} = \pm 97,5$ мм) штепсельного стыка (точки — эксперимент, линия — расчет); 4 — температура на оси железобетонной колонны в т. 2 — рис. 1 (точки — эксперимент, линия — расчет); сплошная линия — расчет при $H_{\text{в}} = 0,45$ мм; пунктирная линия — расчет при $H_{\text{в}} = 0,05$ мм

ее применения на практике. Это позволяет использовать предложенную методику как один из важнейших инструментов разработки процессов электротепловой обработки железобетонных изделий с применением методов компьютерного моделирования, позволяющих значительно ускорить создание новых и эффективных технологических процессов и оборудования для их осуществления в сфере сборно-монолитного строительства.

Другим параметром температурного поля в объеме железобетонного изделия в ходе электротепловой обработки, который во многих случаях может оказаться более важным, чем само значение температуры, является градиент температуры [5]. Он определяет величину внутренних механических напряжений в материале и возможность необратимого и недопустимого его механического повреждения в ходе электротепловой обработки [5]. Надо сказать, что опытное определение величины этого параметра представляет собой сложную задачу. Однако предложенная методика расчета характеристик температурного поля, как показано в первой части статьи [1], позволяет определять величину этого параметра в любой точке материала, а успешная экспериментальная проверка (см. рис. 3) дает основание доверять результатам таких расчетов. Поэтому одновременно с получением расчетных зависимостей (см. рис. 3 была получена расчетная кривая изменения во времени градиента температуры на поверхности бетона, к которой прилегает поверхность нагревателя. Расчеты показали, что именно в этой части материала возникают максимальные значения градиента температуры и наибольшая опасность повреждения материала.

На рис. 4 представлена расчетная кривая изменения во времени величины градиента температуры $\text{grad } T$ в поверхностном слое бетона, полученная в соответствии с условиями эксперимента. Из рис. 4 следует, что максимальное значение этого параметра достигается в момент окончания стадии нагревания, что полностью согласуется с аналогичным результатом, полученным ранее при исследовании характеристик электротепловой обработки электродным методом токами повышенной частоты [5]. Как показано в [5], опасность возникающего градиента оценивается посредством сравнения его

величины с характерными значениями $\text{grad } T_{\text{пр}}^0$ и $\text{grad } T_{\text{пр}}^V$, отмеченными на рис. 4. Первое из них, $\text{grad } T_{\text{пр}}^0$, представляет собой верхнюю границу абсолютно безопасных значений градиентов температуры, при которых внутренние напряжения могут вызывать в материале только упругие деформации [5, 8]. Многократное появление таких градиентов и соответствующих внутренних механических напряжений не приводит к снижению прочности материала. Второй параметр, $\text{grad } T_{\text{пр}}^V$, является нижней границей абсолютно опасных значений градиентов температуры, превышение которой приводит к появлению внутренних напряжений, вызывающих выраженные и быстро нарастающие разрушения структуры бетона, сопровождающиеся псевдопластическими деформациями [5, 8]. В результате этого материал становится практически непригодным для дальнейшего использования.

Возникновение градиентов в диапазоне $\text{grad } T_{\text{пр}}^0 < \text{grad } T < \text{grad } T_{\text{пр}}^V$ приводит к появлению микроразрушений в объеме материала (бетона), а многократные нагружения вызывают постепенное снижение прочности [5, 8]. Именно такая ситуация, как следует из рис. 4, наблюдается в рассматриваемом случае, так как на протяжении первых четырех часов величина градиента температуры находится в указанном диапазоне. Как отмечено в [5, 8], одно-, двух-, трехкратное появление таких градиентов не должно повлечь недопустимого повреждения материала, а однократную электротепловую обработку опытного макета следует считать безопасной.

Как показано в [5], величины $\text{grad } T_{\text{пр}}^0$ и $\text{grad } T_{\text{пр}}^V$ определяются двумя факторами: пределом прочности бетона на сжатие и размером изделия в поперечном сечении. Значения этих параметров, отмеченные на рис. 4, определены для бетона класса В25, который получил широкое применение при изготовлении железобетонных колонн сборно-монолитного строительства, и размера поперечного сечения 300×300 мм лабораторного макета.

Результаты, представленные на рис. 3 и 4, также свидетельствуют о достаточно заметном влиянии толщины воздушного зазора H_v на характеристики температурного поля: с одной стороны, уменьшение этого параметра позволяет несколько ускорить прогрев материала (см. пун-

Рис. 4. Изменение градиента температуры во времени в поверхностном слое бетона в ходе опыта на лабораторном макете: сплошная линия — расчет при $H_{\text{в}} = 0,45$ мм; пунктирная линия — расчет при $H_{\text{в}} = 0,05$ мм

ктирную и сплошную кривые 3 на рис. 3), с другой — за это приходится расплачиваться ростом максимальных градиентов приблизительно в 1,5 раза (см. рис. 4).

Успешная экспериментальная проверка предложенной расчетной методики [1] дает основания для использования ее в целях всестороннего исследования характеристик процесса тепловой обработки штепсельных соединения железобетонных колонн с помощью поверхностного электропрогрева в реальных условиях.

На рис. 5 представлены расчетные зависимости температуры в нагревателе и на оси штепсельного стыка (рис. 5, а), а также градиента температуры вблизи поверхности бетона (рис. 5, б) от времени тепловой обработки штепсельного соединения железобетонных колонн сечением 400×400 мм с помощью поверхностного электропрогрева при различной скорости нарастания температуры в нагревателях. Расчеты выполнены для начальной температуры $T_0 = 0$ °C (минимально допустимое значение температуры окружающего воздуха при сборно-монолитном строительстве) и $T_{\text{изот}} = 50$ °C. На рис. 5, б отмечены характерные значения $\text{grad } T_{\text{пр}}^0$ и $\text{grad } T_{\text{пр}}^{\text{в}}$.

На основании этих зависимостей можно сделать вывод, что скорость подъема температуры на стадии нагревания $v_{\text{н}}$ оказывает заметное влияние на характер повышения температуры

(см. рис. 5, а) в месте расположения стыка, заполненного свежей бетонной смесью, в пределах первых 12–14 ч. В последующее время отличие характеристик быстро уменьшается и к истечению первых суток становится несущественным. Учитывая, что общее время электротепловой обработки (ЭТО) составляет на практике 72 ч (т. е. продолжается еще двое суток), можно сделать заключение о слабом влиянии этого фактора (скорость подъема температуры в нагревателе) на условия твердения бетона в стыке и прочность штепсельного соединения.

Совершенно иная картина наблюдается в случае зависимостей для градиентов температуры (рис. 5, б), которые иллюстрируют весьма существенное влияние этого фактора ($v_{\text{н}}$) на величину градиентов температуры вблизи поверхности железобетонной колонны, соприкасающейся с поверхностью нагревателя. При этом, как и при экспериментах с лабораторным макетом штепсельного соединения (см. рис. 1–4), максимальное значение градиента $\text{grad } T_{\text{max}}$ достигается в момент окончания стадии нагревания (см. рис. 5, б). Характерно, что при максимально возможной скорости подъема температуры, возникающей в случае включения нагревателей на полную мощность, которая, как показали предварительные расчеты и эксперименты, составляет $5500\text{--}6000$ °C/ч, значение $\text{grad } T_{\text{max}}$ достигает катастрофической величины (пунктирная кри-

Рис. 5. Зависимости температуры (а) и градиентов температуры (б) от времени ЭТО при различной скорости роста температуры в нагревателе v_n : 1 — температура в нагревателе; 2 — температура на оси стыка $x_{\text{ш}} = \pm 147,5 \text{ mm}$; пунктирные линии — $v_n = 5500 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$; сплошные — $v_n = 10 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$; штрихпунктирные — $v_n = 6,25 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$

вая, рис. 5, б). Такая ситуация может возникнуть вследствие неисправности источника питания или ошибок персонала и должна быть исключена на практике.

На рис. 6 представлены зависимости величины $\text{grad} T_{\text{max}}$ от скорости нагревания v_n и разности температур $(T_{\text{изот}} - T_0)$, которые получены посредством построения зависимостей вида рис. 5, б и удобны для выбора режимов управления нагревателями применительно к конкретным температурным условиям. Эти зависимости свидетельствуют о том, что даже при сравнительно высоких значениях v_n (до $20 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$), которые обычно не рекомендуются для применения на практике, величина $\text{grad} T_{\text{max}}$ со значительным

запасом не достигает области абсолютно опасных значений $\text{grad} T_{\text{пр}}^v$, т. е. ЭТО не должна вызывать повреждения материала внутренними механическими напряжениями. Однако эти зависимости (см. рис. 6) позволяют сделать и такой вывод, что обеспечение абсолютно безопасных условий ЭТО ($\text{grad} T \leq \text{grad} T_{\text{пр}}^0$) является непростой задачей, так как ее решение требует применения малых значений скорости подъема температуры v_n . Тем не менее, в дальнейшем целесообразно проведение научно-технических разработок по решению такой задачи с помощью предложенной методики [1].

Однако эти зависимости (см. рис. 6) позволяют сделать и такой вывод, что обеспечение

Рис. 6. Зависимость максимального градиента от скорости нагрева v_H и разности температур $(T_{изот} - T_0)$

абсолютно безопасных условий ЭТО ($grad T \leq grad T_{пр}^0$) является непростой задачей, так как ее решение требует применения малых значений скорости подъема температуры v_H . Тем не менее, в дальнейшем целесообразно проведение научно-технических разработок с помощью предложенной методики по решению такой задачи [1].

Выводы

1. Эксперимент, выполненный с помощью специально разработанной и изготовленной лабораторной установки, содержащий макет штепсельного соединения железобетонных колонн сечением 300×300 мм, полностью подтвердил достоверность предложенной в настоящей работе методики расчета характеристик нестационарного температурного поля в ходе ЭТО штепсельного соединения с помощью поверхностного электропрогрева; такая методика является важнейшим инструментом разработки и применения процессов ЭТО при монтаже сборно-монолитных конструкций.

2. Успешная экспериментальная проверка расчетной методики позволила с ее помощью выполнить теоретические исследования характеристик нестационарного температурного поля в штепсельном соединении железобетонных колонн сечением 400×400 мм, получивших наиболее широкое применение на практике, в ходе ЭТО посредством поверхностного электропро-

грева применительно к реальным условиям. Эти исследования показали, что основными факторами, оказывающими влияние на эти характеристики, являются скорость повышения температуры в нагревателе на стадии нагревания v_H , разность температур изотермической выдержки и начальной температуры $(T_{изот} - T_0)$ и толщина воздушного зазора H_B между поверхностью нагревателя и поверхностью бетона.

3. Показано, что при реальных значениях перечисленных факторов обеспечиваются приемлемые температурные условия для твердения свежего бетона в стыке штепсельного соединения и относительно безопасные условия ЭТО с точки зрения возможности повреждения материала (бетона) железобетонной колонны внутренними механическими напряжениями вследствие неизбежного возникновения градиентов температуры в ходе ЭТО; однако на практике возможно появление опасных значений градиентов температуры, например при включении нагревателей на полную мощность при минимальном значении начальной температуры.

4. Установлено, что фактический зазор между поверхностью нагревателя и поверхностью бетона $H_B = 0,45$ мм практически на порядок превышает значение $H_B = 0,05$ мм, определяемое нормативными документами, однако это обстоятельство не влечет за собой каких-либо нежелательных последствий, так как небольшое

снижение скорости роста температуры в месте расположения стыка в начальный период ЭТО не должно оказать существенного влияния на процесс твердения свежего бетона, уложенного в стык, а с другой стороны, такое увеличение этого зазора приводит к существенному снижению максимального значения градиента температуры в бетоне, и, следовательно, снижается риск его повреждения внутренними механическими напряжениями.

5. Ситуация с воздушным зазором, отмеченная в предыдущем пункте, требует, с одной стороны, более серьезного отношения к подготовке бетонной поверхности железобетонных колонн перед установкой на нее поверхностного нагревателя, с другой — дополнительного изучения этого вопроса: подбора возможных на практике вариантов профилей поверхности бетона и нагревателей, наличия и характера их плотного контактирования, распределения температуры и градиентов температуры вдоль профиля поверхности, оценки практического значения этого распределения, величин и опасностей градиентов температуры в местах плотного контакта и т. д.

Библиографический список

1. Федосов С. В., Анисимов С. Н., Соколов А. М. Методика исследования нестационарного температурного поля при наружном электропрогреве штепсельных соединений железобетонных колонн сборно-монолитных сооружений (часть 1) // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 2 (73). С. 35–42.
2. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / под ред. Б. А. Крылова, С. А. Амбарцумяна, А. И. Звездова. М.: НИИЖБ, 2005. 276 с.
3. 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.
4. Федосов С. В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК «ПрессСто», 2010. 364 с.
5. 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.
6. Грызлов В. С., Меньшикова Е. В. Элементы термодинамики бетона. Череповец: Изд-во ЧГУ, 2005. 169 с.

7. Денисенко В. В. Термодатчики: принципы применения, разновидности, погрешности измерений // Современные технологии автоматизации. 2012. № 3. С. 96–98. URL: <http://www.cta.ru/cms/f/447068.pdf>

8. Берг О. Я., Щербачев Е. Н., Писанко Г. Н. Высокопрочный бетон. М.: Стройиздат, 1971. 208 с.

References

1. Fedosov S. V., Anisimov S. N., Sokolov A. M. *Metodika issledovaniya nestatsionarnogo temperaturnogo polya pri naruzhnom ehlektroprogreve shtepsel'nykh soedineniy zhelezobetonnykh kolonn sborno-monolitnykh sooruzheniy (chast' 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)]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 2 (73), pp. 35–42.
2. *Rukovodstvo po progrevu betona v monolitnykh konstruktsiyakh* [Guidance for heating concrete in monolithic structures]. Ed. by B. A. Krylov, S. A. Ambartsumyan, A. I. Zvezdov Moscow, NIIZhB Publ., 2005, 276 p.
3. Bondarenko V. M., Bakirov R. O., Nazarenko V. G., Rimshin V. I. *Zhelezobetonnye i kamennyye konstruktсии* [Reinforced concrete and stone structures]. 4-th ed., revised. Ed. by Bondarenko V. M. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2007, 887 p.
4. Fedosov S. V. *Teplomassoperenos v tekhnologicheskikh protsessakh stroitel'noy industrii* [Heat and mass transfer in technological processes of construction industry]. Ivanovo, IPK PressSto Publ., 2010, 364 p.
5. Fedosov S. V., Bobylev V. I., Sokolov A. M. *Ehlektricheskaya obrabotka betona tokami povyshennoy chastoty na predpriyatiyakh sbornogo betona* [Electrothermal treatment of concrete with high-frequency electric current at the enterprises producing precast concrete]. Ivanovo, IGEhU Publ., IVGPU Publ., 2016, 336 p.
6. Gryzlov V. S., Men'shikova E. V. *Ehlementy termodinamiki betona* [Elements of concrete thermodynamics]. Cherepovets, ChGU Publ., 2005, 169 p.
7. Denisenko V. V. *Termopary: printsipy primeneniya, raznovidnosti, pogreshnosti izmereniy* [Thermocouples: principles of application, varieties, calculation errors]. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii – Modern automation technologies*, 2012, no. 3, pp. 96–98. Available at: <http://www.cta.ru/cms/f/447068.pdf>.
8. Berg O. Ya., Shcherbakov E. N., Pisanko G. N. *Vysokoprochnyy beton* [High-strength concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, 208 p.