

На правах рукописи



Анисимов Сергей Николаевич

**ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ШТЕПСЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ  
КОЛОНН ПРИ МОНТАЖЕ СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы  
(строительство)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

г. Иваново  
2019

Работа выполнена на кафедре «Строительные технологии и автомобильные дороги» ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
**Соколов Александр Михайлович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Блиничев Валерьян Николаевич**, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», Лауреат премий Правительства РФ в области науки и техники

доктор технических наук, профессор  
**Ибрагимов Александр Майорович**, НИУ «Московский государственный строительный университет», профессор кафедры «Металлические и деревянные конструкции»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский Государственный университет им. Н. П. Огарёва»

Защита состоится 28 июня 2019 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметевский проспект., д. 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета [www.ivgpu.com](http://www.ivgpu.com).

Автореферат разослан " " 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



Н.В. Заянчукская

---

*Научный консультант – Заслуженный деятель науки РФ,  
Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники,  
академик РААСН, доктор технических наук, профессор  
Федосов Сергей Викторович*

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность.** В практике современного строительства бетонирование зданий и сооружений производят круглый год. Одним из важных направлений индустриального строительства является переход на сборно-монолитное возведение зданий. Использование каркасных систем позволяет снизить массу зданий, ускорить цикл возведения, оптимизировать удельный расход железобетонных конструкций. В настоящее время актуальным является вопрос омоноличивания штепсельных (вилочных) стыков железобетонных конструкций при пониженных и отрицательных температурах. Нередкие случаи повреждения этих узлов свидетельствуют о недостаточном уровне научно-технических разработок в вопросах создания прочных и надежных штепсельных соединений.

Эффективным методом обогрева бетона является метод электротепловой (электротермической) обработки (ЭТО). Однако в таком случае возникает опасность возможность нарушения структуры бетона штепсельного стыка, вследствие внутренних механических напряжений, вызванных градиентом температуры в условиях электротепловой обработки. Для исследования процессов изменения температуры в объеме обогреваемого бетона необходимо иметь простые инженерные методики расчета исследования характеристик нестационарных температурных полей в объеме материала области штепсельных соединений. Также, несмотря на наличие широкого спектра полимерных и цементно-песчаных смесей, необходимо постоянное совершенствование рецептуры бетонных смесей для качественного заполнения полости штепсельного стыка при изготовлении штепсельных соединений сборных и сборно-монолитных конструкций с обратным соединением.

**Цель исследования**—разработка технологии получения прочных и надежных штепсельных соединений железобетонных изделий (колонн) с помощью электротепловой обработки (ЭТО) посредством поверхностного электропрогрева при монтаже сборно-монолитных конструкций в условиях пониженных и отрицательных температур окружающего воздуха.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Разработать инженерную методику расчета характеристик нестационарных температурных полей в области штепсельного соединения в поперечном сечении железобетонных изделий (колонн) в процессе поверхностной электротепловой обработки.

2. В дополнение и на основе методики расчета характеристик температурного поля в поперечном сечении разработать методику расчета характеристик температурного поля в продольном сечении железобетонных изделий в процессе поверхностной электротепловой обработки штепсельных соединений.

3. Выполнить теоретические исследования характеристик нестационарного температурного поля в поперечном и продольном сечении

железобетонных колонн в области штепсельного соединения и за его пределами в процессе его электротепловой обработки с использованием разработанных расчетных методик в целях разработки рекомендаций по организации экспериментов в лабораторных условиях и применению такой электротепловой обработки в производственных условиях.

4. Разработать и изготовить установку для лабораторных исследований процесса электротепловой обработки штепсельных соединений и выполнить эксперименты по изучению характеристик нестационарного температурного поля в объеме материала в области штепсельного соединения в ходе его электротепловой обработки с использованием поверхностного электропрогрева в целях проверки достоверности, предложенных в настоящей работе расчетных методик.

5. Выполнить экспериментальные исследования составов, предназначенных для заполнения стыков при изготовлении штепсельных соединений в целях уточнения рецептуры этих составов, определения их характеристик и показателей, прежде всего предела прочности на сжатие и прочности соединения элементов штепсельного стыка при твердении этих составов при температурных условиях, соответствующих условиям электротепловой обработки штепсельных соединений.

6. Разработать принципиальные основы создания и применения автоматизированных систем дистанционного (через интернет) и качественного контроля температурных режимов электротепловой обработки штепсельных соединений, обработки поступающей информации и управления процессом такой обработки.

#### **Научная новизна работы.**

1. Разработана методика расчета характеристик нестационарных температурных полей в области штепсельного соединения в поперечном сечении железобетонных изделий (колонн) в процессе электротепловой обработки этого соединения с помощью поверхностного электропрогрева, которая позволяет определять изменение температуры и градиентов температуры в пространстве и во времени в случае, когда поперечное сечение находится в средней части (по высоте) штепсельного соединения.

2. Предложена методика расчета характеристик температурного поля в продольном сечении железобетонных колонн, которая является дополнением и продолжением методики, указанной в предыдущем пункте, и вместе с ней образует необходимый набор инструментов для полноценного исследования характеристик температурных полей при разработке процессов ЭТО штепсельных соединений железобетонных колонн методами компьютерного моделирования.

3. В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований характеристик нестационарного температурного поля в поперечном и продольном сечении железобетонных колонн в процессе ЭТО штепсельного соединения *доказана* универсальность, возможность и

целесообразность применения предложенных расчетных методик для исследования закономерностей и особенностей такого процесса.

4. Получено математическое описание предела прочности при сжатии бетонной смеси, предназначенной для укладки в штепсельный стык, рецептура которой предложена в настоящей работе, в зависимости от отношения мелкий наполнитель/песок и содержания цемента.

#### **Практическая значимость и внедрение результатов работы:**

1. В результате настоящей работы подтверждены универсальность, эффективность, доступность и удобство в применении предложенных в настоящей работе расчетных методик для всестороннего исследования процессов ЭТО штепсельных соединений в целях разработки эффективного оборудования для выполнения таких процессов и выбора рациональных режимов работы.

2. В результате теоретических и экспериментальных исследований выявлено значительное и неоднозначное влияние воздушной прослойки между поверхностью электронагревателя, предназначенного для выполнения ЭТО штепсельного соединения и поверхностью железобетонной колонны вследствие шероховатости и неровности профиля поверхности, что требует проведения, в дальнейшем, отдельных исследований на эту тему.

3. Установлено, что по длине штепсельных стыков наблюдаются неодинаковые температурные условия твердения бетонной смеси в ходе ЭТО штепсельных соединений, что также требует проведения, в будущем, дополнительных исследований этого вопроса и совершенствования процесса ЭТО.

4. Обнаружена возможность возникновения при определенных условиях опасности разрушения материала (бетона) колонн в месте контакта ее поверхности с поверхностью электронагревателей под действием внутренних механических напряжений, возникающих вследствие критической величины.

5. Разработана рецептура мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси, предназначенной для укладки в штепсельные стыки при получении штепсельных соединений железобетонных колонн, обеспечивающая набор необходимых эксплуатационных качеств, таких как высокий предел прочности при сжатии, текучесть, почти полное отсутствие усадки, высокая стойкость к коррозии.

6. Разработана новая технология укладки в штепсельные стыки предложенной в настоящей работе мелкозернистой самоуплотняющейся смеси наливного типа, при монтаже сборно-монолитных конструкций.

7. Экспериментально доказано, что механическая прочность штепсельного стыка, изготовленного с применением предложенной в настоящей работе мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси, твердение которой происходило при температурных условиях ЭТО, превышает прочность стандартных соединений стальных элементов стыка.

8. Разработана установка для ЭТО штепсельных соединений с автоматическим программным управлением процессом этой обработки, использованная в

лабораторных экспериментах и успешно примененная в производственных условиях при получении штепсельных соединений.

9. Разработаны принципиальные основы автоматизированных систем дистанционного (через интернет) и качественного контроля температурных режимов электротепловой обработки штепсельных соединений, обработки поступающей информации и управления процессом такой обработки.

10. Результаты работы использованы в строительстве пятиэтажного многоквартирного жилого дома по адресу: Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Кутузова 30 в виде применения бетонной смеси в шпунтовом соединении арматуры фундамента и колонны в условиях низких температур с применением ЭТО с помощью, изготовленной автоматизированной установки; а также в строительстве многоквартирного жилого дома по улице Димитрова 70, г. Йошкар-Ола в виде мелкозернистой растворной смеси, предназначенной для заполнения швов сборно-монолитного железобетонного каркаса.

#### **Достоверность результатов исследования:**

обеспечивается применением известных методов расчета процессов теплопереноса, методов расчета электрических цепей, применением результатов эксплуатационных испытаний в производственных условиях, согласованием результатов других авторов с результатами, полученными в работе, совпадением расчётных и экспериментальных результатов; использованием современных методов планирования эксперимента совместно с действующими нормативами и правилами проведения исследований; апробацией в условиях круглогодичного строительства; применением программного управления в технологическом процессе обогрева бетона; проведением экспериментов в аттестованной лаборатории с поверенными средствами испытания и измерения;

#### **На защиту выносятся:**

1. Методика расчета характеристик нестационарных температурных полей в области штепсельного соединения в поперечном сечении железобетонных изделий (колонн) в процессе ЭТО этого соединения с помощью поверхностного электропрогрева.

2. Методика расчета характеристик температурного поля в продольном сечении железобетонных колонн в процессе ЭТО.

3. Результаты теоретического исследования характеристик температурных полей в объеме железобетонных изделий в процессе ЭТО штепсельных соединений железобетонных колонн.

4. Методика и результаты экспериментального исследования характеристик температурных полей в объеме материала в области штепсельного соединения в процессе ЭТО с использованием лабораторного макета.

5. Рецептура и методика применения мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси, предназначенной для укладки в штепсельные стыки при монтаже сборно-монолитных конструкций.

6. Результаты исследования характеристик самоуплотняющейся бетонной смеси и макетов штепсельных стыков, изготовленных с ее применением.

7. Конструкция термоактивной опалубки с автоматическим программным управлением процессом ЭТО штепсельного соединения, использованная в лабораторных экспериментах, а также результаты ее применения в производственных условиях при монтаже реальных сборно-монолитных строительных конструкций.

8. Перспективная конструкция установки для ЭТО штепсельных соединений с контролем и управлением процессом ЭТО через интернет.

#### **Апробация результатов исследования**

Результаты исследований докладывались на следующих научных конференциях: Международной научной конференции студентов и аспирантов по естественнонаучным и техническим дисциплинам "Научному прогрессу – творчество молодых" ПГТУ, Йошкар-Ола, 2016г.; 18, 21 Вавиловские чтения. Материалы международной междисциплинарной научной конференции: в 2 частях. ПГТУ, Йошкар-Ола, 2015, 2018г.; Бетон и железобетон – взгляд в будущее: Материалы III Всеросс. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону: МГСУ, 2014; Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: материалы II Всероссийской студенческой конференции в 8 ч. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016 г.

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 19 работ (в том числе 3 патента, 11 статей – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 – в рецензируемых изданиях Scopus.

#### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов, списка использованной литературы из 156 наименований, 5 приложений. Работа изложена на 177 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков, 13 таблиц.

#### **Содержание работы**

**Во введении** обоснованы актуальность темы диссертации, рассмотрены особенности процесса электротепловой обработки бетона в стыках сборно-монолитных конструкций в условиях круглогодичного строительства и влияния температурных градиентов на появления внутренних механических напряжений в штепсельном соединении. Сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, отмечена научная новизна, выносимые на защиту положения, научная и практическая значимость.

**В первой главе** проведен обзор методов зимнего бетонирования. Широкому развитию зимнего бетонирования способствовали исследования советских ученых А.А. Афанасьева, А. В. Вавилова, А. В. Барановского, Н. Н. Данилова, А.М. Зеленина, В.Н. Блиничева, А.М. Ибрагимова, Л.М. Колчеданцева, Б.А. Крылова, А.Е. Кириенко, С.А. Миронова, В. В. Михайлова,

В. М. Москвина, В. Н. Сизова, Б. Г. Скрамтаева, И. Г. Савалова, М.М. Титова, Б.М. Красновского, С.В. Федосова, А.М. Соколова и др. Приведены основные характеристики методов бетонирования от вида конструкций и минимальной температуры окружающей среды. Установлено, что наиболее эффективным методом обогрева при низких температурах является электропрогрев бетона. Важнейшей составной частью разработки процессов электротепловой обработки железобетонных изделий является тщательное исследование характеристик температурных полей в объеме обрабатываемых изделий. Результаты таких исследований позволяют определить изменение в объеме материала (в пространстве и во времени) значения температуры  $T$  и градиентов температуры  $gradT$ , которые неизбежно возникают в ходе обработки. Первый параметр позволяет получить представление о температурных условиях твердения бетона в ходе электротепловой обработки, второй – оценить опасность повреждения материала внутренними механическими напряжениями, которые возникают вследствие наличия градиентов температуры. В итоге появляется возможность разрабатывать рациональные и безопасные режимы электротепловой обработки и эффективное оборудование для ее выполнения.

Рассмотрены основные типы пластифицирующих добавок, применяемых в монолитном строительстве. Исследованиям в области модификации свойств бетона химическими добавками посвящены работы Ю.М. Баженова, Г.С. Рояка, В.Г. Батракова, В.А. Вознесенского, Л.М. Добшица, Т.В. Лященко, В.В. Козлова, П.Г. Комохова, С.В. Федосова, О.П. Мчедлова-Петросяна, В.С. Рамачандрана, В.Б. Ратинова, Т.И. Розенберга, и других учёных.

Сделан общий вывод, что получение прочных, надежных и долговечных штепсельных соединений с использованием ЭТО требует комплексного подхода, важнейшим аспектом которого является предварительное и тщательное исследование характеристик температурных полей в объеме железобетонных изделий (колонн) в области штепсельного соединения в процессе его ЭТО методами компьютерного моделирования. В настоящее время возможность проведения подобных исследований практически отсутствует.

В конце главы приведены цель и задачи исследования.

**Во второй главе** разработаны теоретические вопросы получения качественных штепсельных соединений железобетонных колонн при пониженных температурах с применением ЭТО с помощью поверхностного электропрогрева. Рассмотрены стадии монолитного бетонирования штепсельных стыков в условиях отрицательных температур, сформулированы требования, предъявляемые к каждой стадии, включая процедуру исследования характеристик температурных полей в объеме материала железобетонных изделий в зоне штепсельных соединений в процессе ЭТО теоретическими методами.

В соответствии с задачами диссертационного исследования разработана инженерная методика расчета характеристик нестационарного температурного



поля в области штепсельного соединения средствами программной среды MathCad. Методика основана на решении дифференциального уравнения теплопереноса в трехмерном пространстве

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

где  $T$  – температура, К;  $t$  – время, с;  $\nabla^2$  – оператор Лапласа;  $a = \lambda / (c \cdot \rho)$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $c$  – удельная теплоёмкость материала,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\rho$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

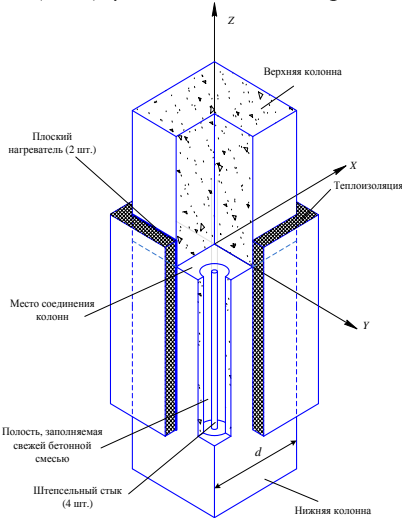


Рис. 1. Схема наружного электропрогрева штепсельного соединения железобетонных колонн

Расчетная схема методики представлена на рис. 1. Благодаря применению теплоизоляции и симметрии температурного поля определение характеристик нестационарного температурного поля в рассматриваемой конструкции (рис. 1) сводится к решению одномерного уравнения теплопереноса

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

Решение этого уравнения выполняется на основе схемы рис. 2, особенностью которой является учет неплотного прилегания поверхности нагревателя к поверхности бетона введением воздушной прослойки толщиной  $H_B$ .

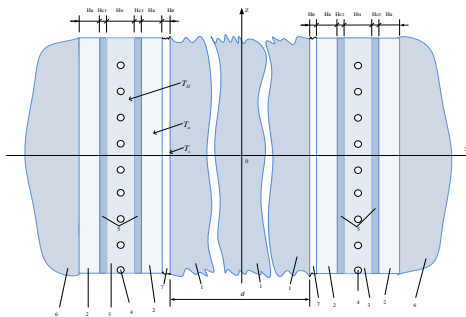


Рис. 2. Расчетная схема контактирования нагревателя с поверхностью бетона

В результате решения уравнения (2) с помощью вычислительного блока Given-Pdesolvev среде MathCad с учетом граничных условий определяется распределение температуры вдоль оси  $x$  для любого момента времени в пределах стадии нагревания:  $0 \leq t \leq \Delta t_{нагр}$  в виде функции  $u(x, t)$ , в том числе распределение  $T_f(x)$  для момента  $t = \Delta t_{нагр}$  окончания стадии нагревания.

Этим завершаются вычисления первого этапа расчета характеристик температурного поля, результаты которого являются формулировкой начальных условий с использованием полинома  $n$ -й степени для вычислений этапа 2 на стадии изотермической выдержки:

$$T_2(x, 0) = T_1(x, \Delta t_{нагр}) = A_n x^n + A_{n-1} x^{n-1} + \dots + A_2 x^2 + A_1 x + A_0, \quad (3)$$

где коэффициенты  $A_n \div A_0$  – действительные числа, которые вместе с величиной коэффициента корреляции ( $r^2$ ) определяются с помощью функций regress (X, Y, n) и Corr(Y, y(x)) среды Mathcad (или Excel, Matlab).

Согласно рис. 2 в элементах (слоях) нагревателя будет возникать свое распределение температуры и ее значение на поверхности  $T_s$ , будет отличаться от температуры в нагревателе:

$$T_H \geq T_s = T_2(-d/2, t) = T_2(d/2, t). \quad (4)$$

Плотность теплового потока  $p_s$ , исходящего от этого слоя, будет иметь одинаковую величину во всех остальных слоях нагревателя:

$$p_s = -\lambda_i \cdot \frac{dT_i}{dx}, \quad (5)$$

в результате интегрирования выражения (5) получена формула, устанавливающая связь между этими значениями температуры в (4):

$$T_s = T_n - p_s \cdot \left( \frac{H_e}{\lambda_e} + \frac{H_a}{\lambda_a} + \frac{H_{cm}}{\lambda_{cm}} \right) \square T_n - p_s \cdot \left( \frac{H_e}{\lambda_e} + \frac{H_{cm}}{\lambda_{cm}} \right), \quad (6)$$

где  $\lambda_e, \lambda_a, \lambda_{cm}$  – коэффициент теплопроводности материалов (рис. 2).

Чтобы использовать соотношение (6) при вычислениях на этапе 1, проводится численная оценка плотности теплового потока:

$$p_s = -\lambda_g \cdot \left( \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right)_{x=0} = -\lambda_g \cdot grad T(d/2, t) \square -\lambda_g \cdot \frac{T(d/2, t) - T(\delta_x, t)}{\delta_x} = -\lambda_g \cdot \frac{u(0, t) - u(\delta_x, t)}{\delta_x}, \quad (7)$$

где  $\delta_x$  – толщина тонкого поверхностного слоя бетона, в пределах которого градиент температуры можно принять постоянным и равным градиенту  $grad T(d/2, t)$  на поверхности бетона ( $x=d/2$ ).

Также разработана методика расчета характеристик температурного поля вдоль оси колонны при электрообогреве штепсельного соединения, которая иллюстрируется рис. 3. В любой точке оси  $z$  (рис. 3) справедливы соотношения

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала – бетона.

Предполагается, что после полного прогрева материала в области штепсельного стыка ( $-z_l \leq z \leq z_l$  – рис. 3) будет иметь место наиболее неравномерное распределение температуры, т.е. наличие максимальных градиентов температуры, вдоль оси колонны (оси  $z$ ), которое существует на протяжении всего времени ЭТО (обычно 72 ч.). Такая ситуация эквивалентна тому, что в прогреваемой области имеет место выделение тепла, мощность объемного источника которого можно оценить следующим образом

$$q_v = \frac{2P_n}{V_{изот}} = \frac{P_n}{l \cdot d \cdot b} = const, \quad (9)$$

где  $P_n$  – электрическая мощность, передаваемая в каждый из нагревателей на стадии изотермической выдержки;  $V_{изот} = 2 \cdot l \cdot d \cdot b$  – объем прогреваемой области. Уравнение тепломассопереноса (1) с учетом объемного тепловыделения будет иметь вид

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T(x, y, z, t) + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (10)$$

справедливо для  $-z_l \leq z \leq z_l$  – рис. 3, где  $z_l = l$  и сводится к выражению

$$\lambda \frac{\partial^2 T_1(z)}{\partial z^2} + q_v = 0. \quad (11)$$

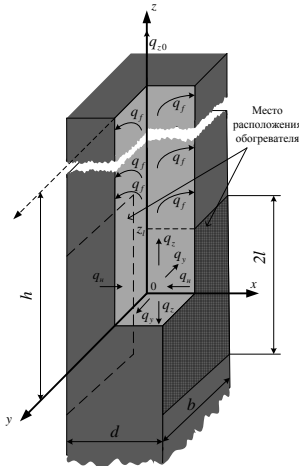


Рис. 3. Расчетная схема для определения характеристик температурного поля вдоль оси железобетонной колонны

За пределами прогреваемой области ( $q_v=0$ ) уравнение (11) приобретает вид

$$\frac{\partial T_2(z, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_2(z)}{\partial z^2}. \quad (12)$$

Расчет характеристик температурного поля проводится в 2 этапа. Результат решения (10) для выполнения вычислений этапа 1 ( $-z_l \leq z \leq z_l$  – рис. 3) имеет вид

$$\begin{aligned} grad T_1(z) &= \frac{\partial T_1(z)}{\partial z} = -\frac{q_v}{\lambda} z = -\frac{P_n}{\lambda \cdot l \cdot d \cdot b} z, \\ T_1(z) &= T_{изот} - \frac{q_v}{2\lambda} z^2 = T_{изот} - \frac{P_n}{2 \cdot \lambda \cdot l \cdot d \cdot b} z^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Для расчетов этапа 2 ( $z_l \leq z \leq h$ ) используется вычислительный блок Given-Pdesolvec учетом граничных условий ( $T_0$  – температура воздуха):

$$T_1(z=l) = T_2(z=l) = T_{изот} - \frac{P_n}{2 \cdot \lambda \cdot d \cdot b} l, \quad T_2(z=h) = T_0, \quad (14)$$

кроме этого, в рамках гл. 2 разработаны требования к бетонным смесям, используемым для заполнения стыков штепсельных соединений.

**В третьей главе** приведены результаты теоретических исследований характеристик температурных полей в объеме материала железобетонных колонн при электротепловой обработке штепсельного соединения с помощью поверхностного электрообогрева, т.е. изменения температуры и градиента температуры во времени и в пространстве, выполненных с помощью предложенных расчетных методик. Выполненные исследования показали, что для заданной конструкции штепсельного соединения основными факторами, оказывающими влияние на характеристики температурного поля, являются скорость повышения температуры в нагревателе  $v_n$ , разность температуры изотермической выдержки и начальной температуры – ( $T_{изот} - T_0$ ) и толщина воздушного зазора  $H_e$  между поверхностью нагревателя и поверхностью

бетона. Показано, что температура в месте расположения штепсельного стыка с твердеющим бетоном достигает установившегося значения равного температуре изотермической выдержки спустя 20÷24 ч. от начала ЭТО. Однако по высоте стыка наблюдается достаточно неравномерное распределение температуры: различие между наибольшим и наименьшим значением этого параметра достигает 33 %. Установлено, что максимальные градиенты температуры возникают в поверхностном слое бетона, обращенном к поверхности нагревателя в момент окончания стадии нагревания и имеют относительно безопасные значения при  $v_n \leq 6 \div 10$  °С/ч. Однако при максимально возможной скорости подъема температуры, возникающей при включении электронагревателей на полную мощность, градиенты температуры достигают катастрофической величины. Положительным результатом является то, что градиенты температуры вдоль оси  $z$  имеют абсолютно безопасные значения.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований показателей и характеристик процесса электротермической обработки штепсельного соединения в лабораторных условиях. Для проведения эксперимента был изготовлен макет штепсельного стыка железобетонных колонн, в различных точках объема которого были установлены термодатчики для измерения температуры в ходе ЭТО. Макет имеет параметры: сечение колонны – 300х300 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. На рис. 4 представлены экспериментальные и расчетные зависимости температуры от времени ЭТО.

Сравнение результатов расчета и эксперимента (зависимости 3 и 4), учитывая, что погрешность измерения температуры составляет  $\pm 2 \div 5$  °С, позволяет сделать вывод о полном согласовании результатов расчета и эксперимента, т.е. о достоверности предложенной методики (гл. 2) и возможности ее применения на практике (гл. 3).

На рис. 5 представлены результаты эксперимента на макете (рис. 3) и вычислений с использованием предложенной расчетной методики (гл. 2) изменения температуры вдоль оси  $z$  (рис. 1,3).

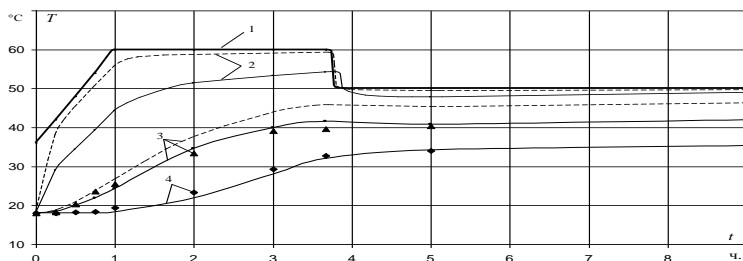


Рис. 4. Изменение температуры в различных точках опытной установки во времени: 1 – температура нагревателей (эксперимент); 2 – температура на поверхности бетона в месте расположения электронагревателей (расчет); 3 – температура в месте расположения (на оси,  $x_{ил} = \pm 97,5$  мм) штепсельного стыка (точки – эксперимент, линия – расчет); 4 – температура на оси железобетонной колонны в т. 2 – рис. 1 (точки – эксперимент, линия – расчет); сплошная линия – расчет при  $H_0 = 0,45$  мм; пунктирная линия – расчет при  $H_0 = 0,05$  мм

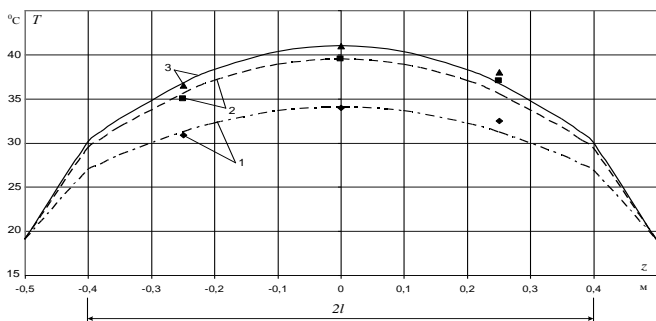


Рис. 5. Изменение температуры вдоль оси  $z$  в ходе ЭТО макета (рис. 4) в различные моменты времени  $t$ : 1 –  $t = 4$  ч. 40 мин; 2 –  $t = 24$  ч.; 3 – 72 ч.; линии – расчет; точки – эксперимент

В этой главе приведены результаты экспериментального исследования характеристик и выбор рационального состава самоуплотняющегося бетона, предназначенного для заполнения штепсельных стыков железобетонных колонн, а также результаты испытаний макетов стыков, изготовленных с использованием такого бетона. Они позволяют сделать вывод о высокой надежности и механической прочности таких стыков в реальных условиях.

В пятой главе представлены результаты применения электротермической обработки при получении штепсельного соединения железобетонных колонн в производственных условиях. Автоматизированная установка ЭТО, использованная в лабораторных экспериментах, была успешно применена при строительстве пятиэтажного жилого дома по адресу: Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Кутузова, 30, а также при строительстве многоквартирного жилого дома севернее ул. Димитрова, 70

### Заключение

1. Разработана инженерная методика расчета характеристик нестационарных температурных полей в области штепсельного соединения в поперечном сечении железобетонных изделий (колонн) в процессе электротепловой обработки этого соединения с помощью поверхностного электропрогрева, которая позволяет определять изменение температуры и градиентов температуры в пространстве и во времени в случае, когда поперечное сечение находится в средней части (по высоте) штепсельного соединения; методика построена на использовании вычислительного блока Given-Pdesolve в среде Mathcad для решения одномерного дифференциального уравнения нестационарного теплопереноса, а программно-алгоритмическая реализация методики выполнена в среде Mathcad.

2. Предложена инженерная методика расчета характеристик температурного поля в продольном сечении железобетонных колонн, которая также реализована в среде Mathcad и вместе с методикой расчета характеристик температурного поля в поперечном сечении образует необходимый набор инструментов для полноценного исследования характеристик температурных полей при разработке процессов ЭТО штепсельных соединений железобетонных колонн; обе методики достаточно доступны широкому кругу пользователей, т.к. использует вычислительные возможности широко распространенной среды Mathcad.

3. Наличие предложенных расчетных методик позволило выполнить теоретические

Они также демонстрируют хорошее согласование опытных и расчетных значений, доказывая достоверность этой методики и результатов теоретических исследований (гл. 3).

исследования характеристик нестационарного температурного поля в объеме материала железобетонных изделий в области штепсельных соединений в процессе их электротепловой обработки, в результате чего выявлен ряд особенностей этого процесса: для заданной конструкции железобетонной колонны и штепсельного стыка основными факторами, оказывающими влияние на характеристики температурного поля, являются скорость повышения температуры в нагревателе на стадии нагревания  $v_n$ , разность температуры изотермической выдержки и начальной температуры –  $(T_{изот} - T_0)$  и толщина воздушного зазора  $H_v$  между поверхностью нагревателя и поверхностью бетона; при реальных значениях перечисленных факторов (рекомендуемая скорость подъема температуры в нагревателе  $v_n \leq 10$  °С/ч.) обеспечиваются приемлемые безопасные температурные условия для твердения свежего бетона в стыке штепсельного соединения; обнаружены неодинаковые температурные условия твердения свежего бетона, уложенного в стыки штепсельных соединений железобетонных колонн в ходе ЭТО этих узлов из-за перепада температуры по длине стыка, достигающего значения 33 % от температуры изотермической выдержки и этот вопрос требует дополнительного изучения в дальнейшем

4. Эксперимент, выполненный с помощью специально разработанной и изготовленной лабораторной установки, содержащий макет штепсельного соединения железобетонных колонн сечением 300x300 мм и автоматизированное устройство для его электротепловой обработки, полностью подтвердил достоверность предложенных в настоящей работе методик расчета характеристик нестационарного температурного поля в ходе ЭТО штепсельного соединения с помощью поверхностного электропрогрева (различие расчетных и опытных значений не более 4,5%); результаты экспериментов также подтвердили наличие неодинаковых температурных условий твердения бетонной смеси по длине штепсельного стыка, которое было выявлено в результате теоретических исследований характеристик температурного поля.

5. Результаты экспериментов показали, что предложенная в настоящей работе рецептура бетонной смеси для укладки в штепсельный стык и технологии ее применения при получении штепсельных соединений железобетонных колонн с применением ЭТО обеспечивает ей необходимый набор эксплуатационных качеств, а высокие показатели механической прочности предложенной бетонной смеси не оставляют сомнений в высокой механической прочности и эксплуатационной надежности штепсельных соединений.

6. Автоматизированное устройство ЭТО было успешно применено в производственных условиях при получении штепсельных соединений железобетонных колонн реальных сборно-монолитных строительных конструкций. Установка позволяет выполнять электротепловую обработку по любому графику в автоматическом режиме, который задается программой и формируется либо на основании исследований характеристик температурных полей в материале области штепсельного соединения с помощью предложенных в настоящей работе методик (гл. 2), либо задается проектировщиком. Испытания установки показали, что при изменении температуры изотермической выдержки от 30 до 40 °С удельный расход электроэнергии возрастает от 60 до 80 кВтч/м<sup>3</sup>, а время достижения бетоном, уложенным в штепсельные стыки, равной прочности снижается на 22 %, т.е. существует возможность оптимизации процесса электротепловой обработки, в дальнейшем. В целях совершенствования процесса получения штепсельных соединений разработаны принципиальные основы автоматизированных систем дистанционного (через интернет) контроля температурных режимов электротепловой обработки штепсельных соединений и управления ею.

**Основные результаты диссертации отражены в следующих публикациях:**

**Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и патенты:**

1. Анисимов, С. Н. Влияние поликарбоксилатных суперпластификаторов на структурообразование цементных паст / Л. М. Добшиц, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов, А. Ю. Лешканов // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 5-5. – С. 945-948.
2. Анисимов, С. Н. Исследование влияния комплекса модификаторов на кинетику твердения бетонов [Электронный ресурс] / С. Н. Анисимов, О. В. Кононова, А. Ю. Лешканов, А. О. Смирнов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 4. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14082>.
3. Анисимов, С. Н. Исследование обогрева бетона стыковых зон каркасных конструкций в термоактивной опалубке / Ю. А. Минаков, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 8-6. – С. 1313-1317.
4. Анисимов, С. Н. Исследование прочности тяжелого бетона с пластифицирующими и минеральными добавками [Электронный ресурс] / С. Н. Анисимов, О. В. Кононова, Ю. А. Минаков и др. // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 2-1. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21276>.
5. Анисимов, С. Н. Кинетика набора прочности цементного камня с модифицирующими добавками Биотех-НМ и Glenium 51 / Л. М. Добшиц, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов // *Цемент и его применение*. – 2011. – № 4. – С. 104-107.
6. Анисимов, С. Н. Пластифицированные малоцементные бетоны с добавкой микрокремнезема [Электронный ресурс] / Ю. А. Минаков, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов и др. // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 2-1. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21300>.
7. Анисимов, С. Н. Снижение энергопотребления при обогреве бетона в термоактивной опалубке / Ю. А. Минаков, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов // *Приволжский научный журнал*. – 2013. – № 2 (26). – С. 46-52.
8. Анисимов, С. Н. Управление кинетикой твердения бетона при отрицательных температурах / Ю. А. Минаков, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов, М. В. Грязина // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 4-2. – С. 307-311.
9. Анисимов С.Н. Эффективность применения пластифицирующих добавок в производстве тяжелого бетона [Электронный ресурс] / В.А. Сленьков, Ю.А. Минаков, О.В. Кононова и др. // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 2-1. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21287>.
10. Федосов, С.В. Температурное поле вдоль оси железобетонных колонн сборно-монолитных сооружений при наружном электропрогреве штепсельных соединений / С.В. Федосов, А.М. Соколов, **С.Н. Анисимов** // *Вестник ПГТУ. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2019 № 1.- С. 57-69.
11. Федосов, С.В. Методика исследования нестационарного температурного поля при наружном электропрогреве штепсельных соединений железобетонных колонн сборно-монолитных сооружений / С.В. Федосов, **С.Н. Анисимов**, А.М. Соколов // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 2. С. 35-42.
12. Anisimov S. Self-compacting fine-grained concrete for reinforced concrete frame joints filling / Anisimov S., Kononova O.B.// *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 21, Construction - The Formation of Living Environment. 2018. C. 032050.

13. Пат. 123161 Российская Федерация. Устройство для определения теплофизических качеств обогреваемого бетона по температуропроводности в натуральных условиях / Муреев П. Н., Анисимов С. Н., Минаков Ю. А., Кононова О. В., Котлов В. Г.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2011154259/28; заявл. 28.12.2011; опубл. 20.12.2012, Бюл. № 35. – 2 с.

14. Пат. 2507355 Российская Федерация. Термоактивная опалубка с автоматическим программным управлением процессом тепловой обработки бетона / Минаков Ю. А., Кононова О. В., Анисимов С. Н.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2012133062/03; заявл. 01.08.2012; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5. – 8 с.

15. Пат. 2603991 Российская Федерация. Мелкозернистая самоуплотняющаяся бетонная смесь / Кононова О. В., Анисимов С. Н., Лешканов А. Ю., Смирнов А. О.; заявитель и патентообладатель Поволжский государственный технологический университет. – № 2015117992/03; заявл. 13.05.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 5 с.

#### **Научные статьи, доклады:**

1. Анисимов, С. Н. Влияние температуры твердения на раннюю прочность пластифицированного бетона / С. Н. Анисимов // Восемнадцатые Вавиловские чтения: материалы международной междисциплинарной научной конференции: в 2 ч. / под общ. ред. В.П. Шалаева. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – Ч. 2. – С. 139-141.

2. Анисимов, С. Н. Пути совершенствования термоактивных опалубок / Минаков Ю.А., Котлов В.Г., Сленьков В.А., Анисимов С.Н. // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2017. – №20. – С. 215-217.

3. Анисимов, С. Н. Термоактивная опалубка с автоматическим программным управлением процесса тепловой обработки бетона / Ю. А. Минаков, В. Г. Котлов, С. Н. Анисимов // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2017. –№20. – С. 212-214.

4. Анисимов, С. Н. Ускорение твердения бетона в зимнее время методами теплового воздействия / С. Н. Анисимов, О. В. Кононова // Двадцать первые Вавиловские чтения: материалы международной междисциплинарной научной конференции: в 2 ч. / под общ. ред. проф. В.П. Шалаева. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 166-167.

Подписано в печать 2019 г. Формат 60×84 1/16

Бумага писчая. Ризограф. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 100 экз.

Заказ № .

Редакционно-издательский центр  
Поволжского государственного технологического университета  
424000, г. Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17