

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Поволжский государственный технологический университет»

На правах рукописи



Анисимов Сергей Николаевич

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

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., доцент Соколов
Александр Михайлович

Йошкар-Ола

2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. Современное состояние вопроса и проблемы получения штепсельных соединений железобетонных конструкций	13
1.1. Методы, особенности и проблемы бетонирования при использовании штепсельных соединений железобетонных колонн.....	13
1.2. Виды тепловой обработки бетона и железобетонных конструкций в зимних условиях.....	22
1.3. Методы исследования температурных условий твердения бетонных смесей при использовании электрообогрева.....	32
1.4. Типы, показатели, характеристики материалов, используемых для заполнения штепсельных стыков.....	40
1.5. Выводы по главе 1, постановка цели и задач диссертационного исследования.....	46
ГЛАВА 2. Разработка теоретических вопросов процесса электротермической обработки при получении штепсельного соединения железобетонных колонн.....	50
2.1. Стадии процесса и условия получения штепсельных соединений железобетонных колонн с применением электротермической обработки.....	51
2.2. Методика расчета характеристик нестационарного температурного поля в объеме материала при наружном электропрогреве штепсельных соединений железобетонных колонн сборно-монолитных сооружений.....	53
2.2.1 Разработка методики расчета характеристик нестационарного температурного поля в области штепсельного соединения средствами программной среды MathCad.....	54
2.2.2 Методика расчета характеристик температурного поля вдоль оси железобетонных колонн при электротепловой обработке штепсельного соединения.....	65

2.3. Разработка требований, предъявляемых к материалу для заполнения штепсельных соединений, обоснование его вида и предполагаемого состава.....	72
2.4. Выводы по главе 2.....	76
ГЛАВА 3. Теоретическое исследование температурных полей в объеме материала железобетонных колонн при электротепловой обработке их штепсельного соединения с помощью поверхностного электрообогрева.....	78
3.1. Характеристики нестационарного температурного поля в поперечном сечении штепсельного соединения на стадии нагревания...	78
3.2. Исследование временных характеристик температурного поля в поперечном сечении штепсельного соединения в ходе ЭТО.....	82
3.3. Характеристики температурного поля в продольном сечении железобетонных колонн при электротепловой обработке их штепсельного соединения.....	88
3.4. Выводы и рекомендации по применению электрообогрева при получении штепсельных соединений железобетонных колонн.....	92
ГЛАВА 4. Экспериментальные исследования показателей и характеристик процесса электротермической обработки штепсельного соединения в лабораторных условиях.....	95
4.1. Исследование характеристик температурного поля в объеме материала с использованием макета штепсельного соединения.....	96
4.2. Исследование характеристик и выбор рационального состава самоуплотняющегося бетона, предназначенного для заполнения штепсельных соединений железобетонных колонн на основании результатов лабораторных экспериментов.....	105
4.3. Исследование качества и характеристик механической прочности штепсельного соединения.....	116
4.4. Выводы по главе 4.....	128

ГЛАВА 5. Применение электротермической обработки при получении штепсельного соединения железобетонных колонн в полевых производственных условиях.....	131
5.1. Разработка технологии укладки бетонной смеси в обратные (двойные) штепсельные соединения в полевых условиях.....	131
5.2. Разработка оборудования, оснастки для поверхностного электрообогрева и режимов электротермической обработки при получении штепсельных соединений в производственных условиях.....	134
5.3. Характеристики и показатели процесса электротепловой обработки при получении штепсельных соединений в производственных условиях.....	141
5.4. Выводы по главе 5	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	154
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	173

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы исследования. 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. На данный период все чаще встает вопрос омоноличивания штепсельных (вилочных) стыков железобетонных конструкций при пониженных и отрицательных температурах. Создание благоприятных условий твердения для бетона в начальный период позволяет получать конструкции необходимого качества за счет актуальных и прогрессивных решений в инфраструктуре строительства.

На сегодняшний день одним из эффективных способов обогрева бетона является метод электротепловой (электротермической) обработки (ЭТО). Ряд широко известных ученых (Б.А. Крылов, Ю.М. Баженов, С.А. Миронов, В.М. Бондаренко, С.М. Трембицкий, А.С. Арбенев, Л.М. Колчеданцев, Б.М. Красновский, М.М. Титов, С.В. Федосов, Н.Ф. Афанасьев, Н.Г. Пшонкин и др.) сходятся во мнении, что перспективным с точки зрения повышения энергоэффективности технологии бетонирования при зимнем бетонировании является применение электротепловой обработки бетона и железобетона [31-37, 87, 100, 104, 105, 123-134]. Однако в таком случае возникает опасность возможность нарушения структуры бетона штепсельного стыка, вследствие внутренних механических напряжений, вызванных неквалифицированным, по-видимому, выполнением 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-

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

песчаных смесей, необходимо постоянное совершенствование рецептуры бетонных смесей для качественного заполнения полости штепсельного стыка при изготовлении штепсельных соединений сборных и сборно-монолитных 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. Разработка инженерной методики 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.

2. Разработка методики расчета характеристик температурного поля в продольном сечении железобетонных изделий в процессе электротепловой обработки штепсельных соединений этих изделий, как в области штепсельных соединений (прогреваемой области), так и за ее пределами.

3. Выполнение теоретических исследований 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. Разработка установки 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 с помощью этой лабораторной установки в целях проверки достоверности предложенных в настоящей работе расчетных методик, получения дополнительной информации и уточнению рекомендаций по применению электротепловой обработки в производственных условиях.

5. Выполнение экспериментальных исследований составов, предназначенных для заполнения стыков при изготовлении штепсельных соединений в целях уточнения рецептуры этих составов, определения их различных 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. Разработка принципиальных основ 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, например, при включении электронагревателей на полную мощность, что требует принятия мер по недопущению таких ситуаций на практике.

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, высокая ранняя прочность, почти полное отсутствие усадки, высокая стойкость к коррозии при твердении этой смеси в температурных условиях ЭТО.

6. Разработана новая технология укладки в штепсельные стыки предложенной в настоящей работе мелкозернистой самоуплотняющейся смеси наливного типа, при монтаже сборно-монолитных конструкций, обеспечивающая качественное (т.е. без дефектов).

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 стальных элементов стыка (выпуск и паз, т.е. труба), что не оставляет сомнений в необходимых прочности и надежности получаемых штепсельных соединений.

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 железобетонных колонн реальных сборно-монолитных строительных конструкциях.

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 обеспечена:

применением известных методов расчета процессов тепломассопереноса, 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.

Личный вклад автора. Автор диссертационной работы самостоятельно сформулировал цели и задачи, выбраны объекты и методики исследований, разработал программу теоретических и экспериментальных исследований, разработал конструкцию экспериментальных установок и обеспечил их изготовление, лично получены, обработаны и проанализированы основные результаты, практическая реализация которых так же проводилась при непосредственном участии автора. Результаты работы отражены в совместных публикациях, выполненных в соавторстве с академиком РААСН, доктором технических наук, профессором С.В. Федосовым, доктором технических наук А.М. Соколовым, автор лично участвовал в проведении теоретических и экспериментальных исследований и их обсуждении.

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. Рецепт 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.

Публикации

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

Структура и объем работы

Структура диссертации обусловлена целью и задачами, решаемыми в работе. 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.

ГЛАВА I. Современное состояние вопроса и проблемы получения штепсельных соединений железобетонных конструкций

1.1. Методы, особенности и проблемы бетонирования при использовании штепсельных соединений железобетонных колонн

Бетонирование зданий и сооружений производят круглый год. Одним из основных требований современного строительства является ускорение процесса возведения монолитных конструкций. Данное условие во многом определило развитие такого вектора направления, как сборно-монолитное строительство. Ряд неоспоримых преимуществ, выражаемый в снижении расхода железобетона на единицу площади здания, высокой скорости монтажа, предполагает его широкое использования в промышленном и гражданском строительстве [33, 86, 107]. Несущими элементами в монолитном и сборно-монолитном здании, как правило, являются каркасные системы, состоящие из железобетонных плит перекрытия, ригелей и колонн, соединяемых жесткой заделкой. [1, 41, 53, 103].

Для ускорения темпов возведения каркаса колонны часто изготавливают на высоту в несколько этажей и соединяют между собой безсварным соединением. В таком случае применяется штепсельный (вилочный) способ соединения, который значительно облегчает процесс монтажа и не требует большого количества дополнительного оборудования с привлечением рабочих высокой квалификации [43, 55, 103, 112].

Для конструирования каркаса применяют сборные железобетонные колонны, выполняемые на несколько этажей с проемом в уровне перекрытия. Торцы колонн в зоне их стыковки по высоте, имеют выпуск арматуры и пазы для хода выпусков арматуры (рис. 1.1 - 1.3) [55]. Однотипность стыка колонн различного поперечного сечения в пределах базового размера обеспечивается тем, что выпуски арматуры и пазы выполнены и нижнем и верхнем торцах

колонны. За пределами базового ядра выпуски арматуры и пазы выполнены соответственно на верхнем и нижнем торцах стыкуемых колонн, что позволяет выполнять стыковку колонн с различной формой поперечного сечения. Нижняя часть этажной секции колонн имеет криволинейный канал для заполнения зазора, который образуется под нижней плоскостью секции колонн после замоноличивания каркасных элементов, что снижает податливость узлов сопряжения элементов каркаса и повышает жёсткость каркаса и здания в целом.

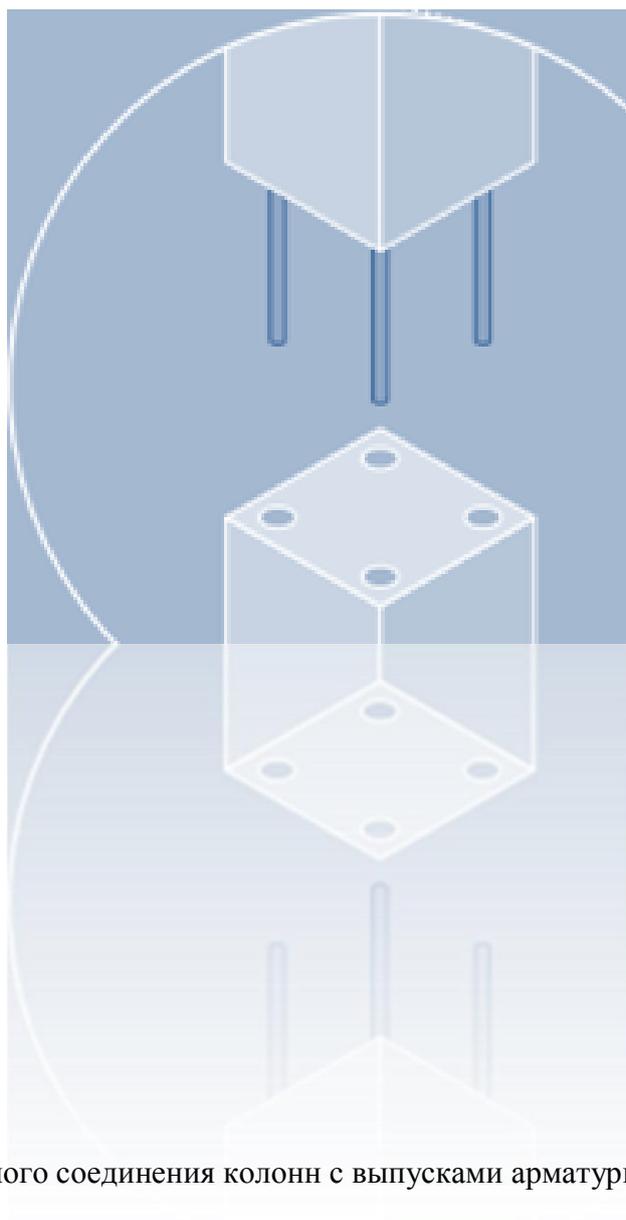


Рис. 1.1. Схема штепсельного соединения колонн с выпусками арматуры в верхней части.

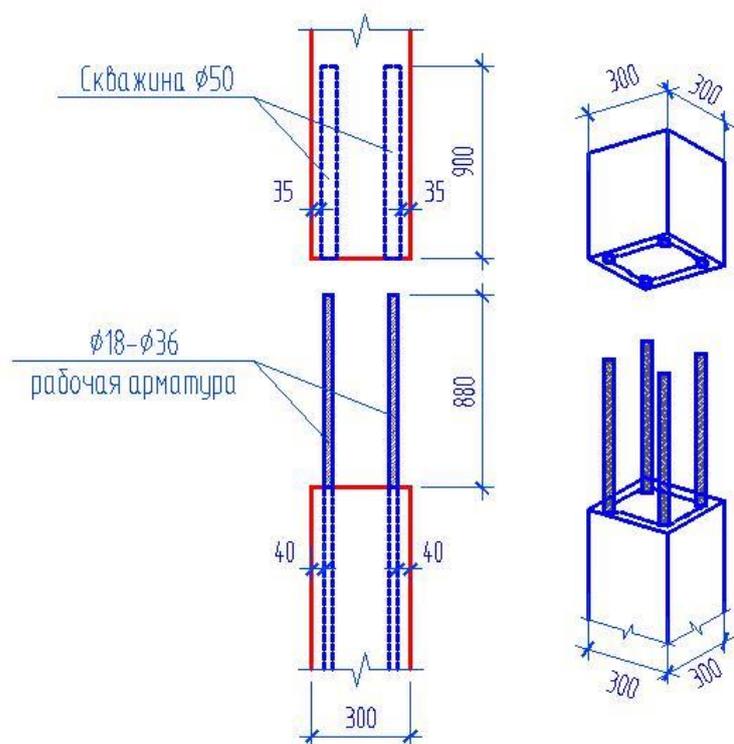


Рис. 1.2. Схема штепсельного соединения колонн с выпусками арматуры в нижней части

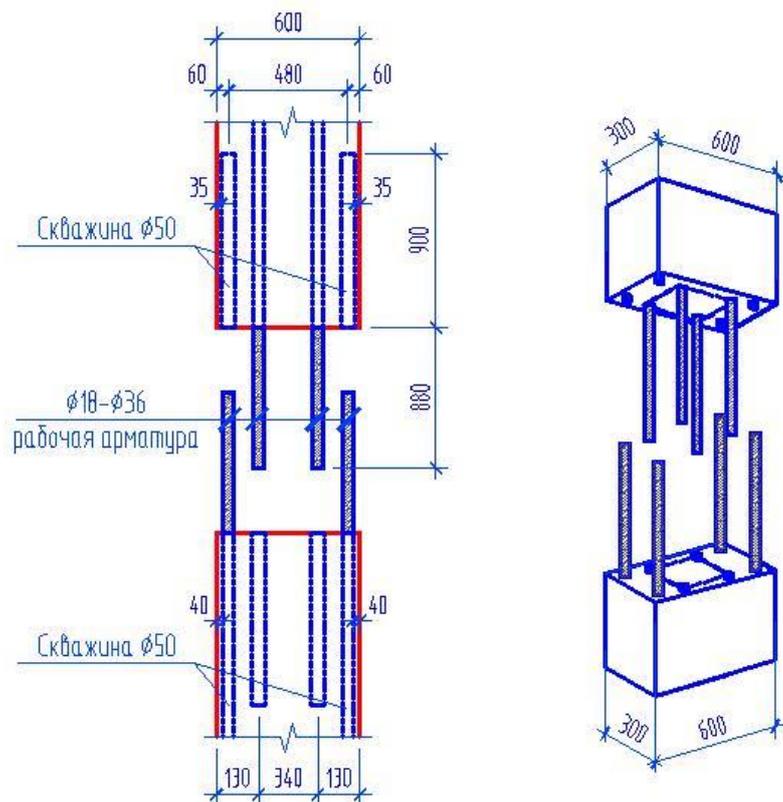


Рис. 1.3. Схема штепсельного соединения колонн с выпусками в верхней и нижней части

Известно, что процесс гидратации цементного вяжущего находится в сильной зависимости от температуры: при её снижении до 0 °С, скорость реакции значительно снижается, что приводит к ухудшению показателя механической прочности бетона в стыках колонн. Если бетон будет подвергнут замораживанию, в его теле неизбежно возникнут внутренние напряжения от давления образовавшегося льда, разрушающие структуру соединения. Условием набора проектной прочности бетона является достижение им 30-50% проектной прочности к моменту замерзания. Прочность, при которой дальнейшее воздействие замерзания не оказывает влияния на физико-механические свойства бетона, называется критической [87, 105, 114, 115].

На данный период все чаще встает вопрос омоноличивания штепсельных (вилочных) стыков железобетонных конструкций при пониженных и отрицательных температурах. Создание благоприятных условий твердения для бетона в начальный период позволяет получать конструкции необходимого качества за счет актуальных и прогрессивных решений в инфраструктуре строительства. Благоприятный температурный режим для твердеющего бетона можно создать разными способами: предварительным разогревом бетона, методом термоса, введением в бетон химических модификаторов, снижающих температуру замерзания воды, тепловым воздействием греющих опалубок на свежеложенный бетон, методом электродного прогрева; инфракрасными излучателями теплоты. Окончательный способ бетонирования выбирают с учетом вида конструкций, наружной температуры, особенностей используемого бетона, а также экономической эффективности [31, 37, 38, 41, 42, 50, 68, 69, 72, 74, 104, 105, 115, 116, 139, 142].

В практике современного монолитного домостроения широко внедряются прогрессивные решения по улучшению физико-механических свойств бетона посредством применения химических добавок. Известно, что основными модификаторами бетона, улучшающими ряд ключевых физико-

механических свойств, являются добавки пластифицирующего действия. Однако их применение увеличивает время сохраняемости бетонной смеси, что в нормальных условиях твердения ведет к потере ранней прочности бетона. Учитывая, что критерием мероприятий по обогреву считается достижение бетоном прочности на уровне 70% от проектной, особого внимания заслуживает возможность применения пластифицированных бетонных смесей, твердеющих в условиях повышенных температур [39, 49, 72, 90, 93, 102, 106, 132, 153, 154]. Возможность сокращения периода твердения пластифицированного бетона посредством оптимизации состава бетона и рационального обогрева является актуальной задачей зимнего бетонирования.

Следует отметить, что применение отдельных методов и принципов зимнего бетонирования находится в тесной связи с материаловедческой основой (видами цемента, их минералогическим составом, свойствами заполнителей, подвижностью смеси и др.) [39, 44, 51, 58, 59, 71, 72, 76, 77, 80, 88, 91, 108, 140, 144, 145].

Также при зимнем бетонировании большое значение имеют вид и тип конструкции, влияющей на способ ее прогрева. В частности, при электропрогреве, для расчетов требуемой мощности источников, характера формирующегося температурного поля, продолжительности остывания (слоя теплоизоляции) применяются расчеты по технологии организации и производства работ, методы математического моделирования, где требуется владение информационными компьютерными технологиями [36, 61, 82, 100, 114, 117, 124, 126, 127, 128, 129, 130, 132, 136, 155].

От степени монолитности сопряжений между элементами сборно-монолитных конструкций зависит эксплуатационная надежность и долговечность зданий [36, 47, 48, 50, 53, 55, 60, 85, 66, 72, 121]. Для изготовления колонн со стыками воспринимающими сжимающие нагрузки следует использовать тяжелый бетон класса прочности не ниже В30. При действии в штепсельном стыке продольных и поперечных сил, вызванных

особыми сочетаниями нагрузок, рекомендуется использовать тяжелый бетон класса не ниже В40. В проектной документации на монолитные железобетонные здания встречается решение, когда колонны приняты из бетона класса В40, а перекрытия из бетона - класса В25. В связи с этим класс бетона в зоне стыка колонны и перекрытия должен быть соответствовать классу бетона перекрытия [1, 40, 53, 103, 112].

Известно, что при обогреве штепсельных стыков железобетонных колонн возникает процесс движения влаги от уложенного бетона к контактной поверхности конструкции. Данный процесс обусловлен эффектом термодиффузии, вследствие которой появляется прослойка жидкой фазы, ухудшающая сцепление поверхности, а также оказывающая негативное влияние на несущую способность конструкции в целом [32, 34, 35, 89, 131, 137, 138].

Вследствие вышеуказанных факторов, при омоноличивании контактных стыков сборных конструкции в условиях отрицательных температур обязательно требуется предварительно отогреть замерзшие участки стыкуемых элементов: частей колонн выше и ниже уровня перекрытия [52, 72, 97, 103]. Необходимо учитывать, влияние температуры воздуха, сроки работ по технологической карте, наличие теплоизолирующих материалов, чтобы тепло от прогрева равномерно распределилось по всему объему отогреваемой конструкции. Нередко встречаются негативные последствия процессов обогрева стыковых конструкций. В случае отключения обогрева или его отсутствия, а также неправильной технологии, бетонная смесь в стыке замерзает. Расширение стыка приводит к разрушению стыка, представленного на рис. 1.4 – 1.7. На сегодняшний день прогрев производится на этапе завершения монтажа элементов в пределах этажа, с применением конвективных методов тепловой обработки.



Рис. 1.4. Трещина в стыке от промерзания бетона



Рис. 1.5. Вариант трещины в стыке от промерзания бетона



Рис. 1.6. Трещина в стыке колонны и перекрытия от промерзания бетона



Рис. 1.7. «Приподнятый» от промерзания стык колонн

Данный способ является комплексным методом набора необходимой (критической) прочности бетона для последующего монтажа каркаса. На продолжительность отогрева элементов стыка влияют способы обогрева, погодные условия и особенности конструкции стыка. Как правило, это время составляет не менее 6 часов [31, 83, 87, 97, 104, 105, 125].

Высокий модуль поверхности, а также малые объемы бетона требуют применения технологий, создающих плавный разогрев смесей со скоростью не более 10 °С/ч, поддержание изотермического прогрева до получения 70 % проектной прочности и остывания для исключения возникновения деструктивных процессов в монолитных участках [87, 97, 104, 105].

Широкое применение при электротепловой обработке бетона получили методы обогрева с помощью нагревательных проводов. Такой способ обеспечивает кондуктивную передачу всего выделяемого тепла бетонной смеси.

В качестве нагревательных проводов используют стальную проволоку с термостойким покрытием, способным выдерживать температуру прямого воздействия до 100 °С. Расчет параметров электропрогрева ведется к определению рабочего напряжения при минимально допустимой длине провода и максимально допустимой для него мощности. Так, для прогрева бетонной смеси стыка колонн с ригелем сечением 300x300мм расчетная мощность составляет 25 кВт/м³, что соответствует шагу проводов 4 - 5 см с погонной нагрузкой до 40 Вт [113]. Применение понижающих трансформаторов со ступенями 40 – 127 В позволяет регулировать тепловую мощность греющих проводов при изменении температуры среды. При температуре прогрева 58 °С продолжительность набора 70 %-й прочности составляет от 24 до 26 часов, при 50 °С – от 46 до 48 часов и при 42 °С – от 64 до 68 часов [113].

Для обеспечения качественного заполнения стыка предлагается использовать мелкозернистые бетонные смеси, не требующие вибрационного воздействия, обладающие высокими показателями текучести, прочности,

соответствующей классу бетона сборного каркаса. [45, 46, 47, 54, 69, 70, 94, 106, 120].

Порядок работ и расчет режимов отогрева и прогрева ведется по типовым или вновь разработанным технологическим картам. Контроль прочности твердеющего бетона производится приборами неразрушающего контроля. В журнале бетонных работ обязательно отражаются способы и данные термоконтроля, наличие или отсутствие теплоизоляции, прочностные показатели прогреваемого бетона [31, 52, 104, 105].

Штепсельные стыки сборных железобетонных конструкций все шире применяются в строительстве, но в некоторых случаях качество производства монолитных работ не соответствует нормативным требованиям по обеспечению конструктивной и эксплуатационной безопасности. В таком случае необходимо вести проектирование по разработанным рекомендациям, строительные работы вести строго по проекту. Для создания благоприятных условий прогрева штепсельных стыков необходимо учитывать, что рациональные режимы электротепловой обработки, как правило характеризуются плавным подъемом температур (не более 15 °С/час), и значительно снижают опасность возникновения внутренних напряжений в бетоне [62, 84, 130, 131, 134].

1.2. Виды тепловой обработки бетона и железобетонных конструкций в зимних условиях.

Наиболее трудоемким и энергозависимым процессом в строительстве является бетонирование. Зимними принято считать условия, при которых среднесуточная температура наружного воздуха не выше 5 °С, и минимальная суточная температура ниже 0 °С. В европейской части России такой период составляет в среднем 5 – 6 месяцев, а в северных и восточносибирских территориях до 10 месяцев [104].

Основными способами зимнего бетонирования являются: метод обогрева, метод термоса, введение в бетон противоморозных добавок (ПМД) [87, 101, 105]. Несмотря на простоту и экономичность, при значительных колебаниях отрицательных температур довольно затруднительно установить рациональную дозировку ПМД, поэтому от применения ПМД приходится отказываться в пользу методов обогрева бетона. Необходимо также учесть важный факт, что применение ПМД откладывает набор критической прочности бетона на длительный срок [104].

Исходя из требований интенсификации строительных процессов, методов обогрева является наиболее обоснованным. При обогреве бетон способен в кратчайшие сроки набрать необходимую прочность, поэтому на сегодняшний день методы теплового воздействия широко распространены [31, 38, 62, 98, 99, 114]. Среди способов тепловой обработки технологичными считаются методы электрообогрева, практически не имеющие альтернативы при зимнем бетонировании в условиях экстремально (до -45°C) низких температур [86].

Известно, что основными модификаторами бетона, улучшающими ряд ключевых физико-механических свойств, являются добавки пластифицирующего действия [64, 65, 102, 156]. Однако их применение увеличивает время сохраняемости бетонной смеси, что в нормальных условиях твердения ведет к потере ранней прочности бетона. Учитывая, что критерием мероприятий по обогреву считается достижение бетоном прочности на уровне 70% от проектной, особого внимания заслуживает возможность применения пластифицированных бетонных смесей, твердеющих в условиях повышенных температур [149, 151]. Возможность сокращения периода твердения пластифицированного бетона путем оптимизации состава бетона и рационального обогрева является актуальной задачей зимнего бетонирования.

Широкому развитию зимнего бетонирования способствовали исследования ученых А.А. Афанасьева, А. В. Вавилова, А. В. Барановского,

Н. Н. Данилова, А. М. Зеленина, 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. Совалова, Б.М. Красновского, М.М. Титова, С.В. Федосова С.В., А.М. Соколова и др.

Известно, что бетон является искусственным камнем, получаемым в результате твердения смеси из цемента, воды и заполнителей. Образование и твердение цементного камня проходят через стадии формирования коагуляционных кристаллических структур [40, 44, 45, 72, 119, 125].

Механизм твердения цементного камня описывается процессом образования сольватных оболочек, связывающих и обволакивающих частицы цемента при взаимодействии с водой. В процессе гидратации вяжущего в цементном тесте образуются кристаллы, формирующие в последствии сплошную кристаллическую решетку. Данный процесс обеспечивает необходимый рост механической прочности бетона. Основными факторами, влияющими на этот показатель, являются температура твердения, свойства воды и минералогический состав вяжущего [44, 72, 89, 139].

Как было установлено, рост прочности бетона возможен только при условии сохранения воды в состоянии жидкой фазы. Поэтому основные методы зимнего бетонирования базируются на двух основных способах: использования собственных тепловыделений цемента и внешних источников тепла; снижения температуры замерзания воды и использовании собственных тепловыделений цемента [75, 87, 104].

Поскольку процессы гидратации при пониженных температурах развиваются медленно и такими же темпами прирастает прочность, возникает еще один главный принцип зимнего бетонирования. При твердении бетонов в условиях отрицательных температур производитель работ должен обеспечить в общем случае набор критической прочности бетона, позволяющей после замораживания и последующего оттаивания достичь заданной прочности (марки или класса бетона). В отдельных случаях

ставится задача достичь распалубочной или отпускной прочности, которая может достигать 90...100 % от марочной [66, 146].

Чем выше температура твердения, тем короче срок набора критической прочности (критический возраст) [104].

Для обеспечения высоких внутренних тепловыделений применяется высокопрочный и быстротвердеющий портландцемент с повышенным содержанием C_3S и C_3A , добавки ускорители твердения цемента, пластифицирующие добавки, позволяющие снизить количество воды в смеси и в дальнейшем увеличить прочность бетона [56, 102, 141, 143].

Для обеспечения комплексного воздействия на обогреваемую конструкции применяют методы «активной термообработки», заключающуюся в подаче тепла на период подъема, изотермического выдерживания и контролируемого снижения температуры [38, 87, 97, 133, 134, 135].

В зависимости от технологии доставки тепла к бетону различают: пропаривание, электропрогрев, инфракрасный обогрев, индукционный нагрев, конвективный обогрев, выдерживание в термоактивных (греющих) опалубках, прогрев внутренними источниками (греющие провода) и др. Стоит учесть, что методы «термоса», «тепляков» в комбинации с предварительным разогревом тоже относятся к этой группе, но в комбинации с химическими модификаторами предпочтительней отнести их ко второй [31, 32, 73, 98, 99, 104].

При использовании второго способа применяют добавки ПМД. В зависимости от дозировки, температура замерзания воды может быть снижена до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако гидратации цемента существенно замедляется, и время набора бетоном критической прочности увеличивается. В зависимости от добавок и температуры окружающего воздуха к 28 суткам бетон, твердеющий на морозе, способен набрать до 50 % от своей марочной прочности [101].

Выбор метода зимнего бетонирования во многом определяется массивностью конструкции или «модулем поверхности» [87, 104]

$$M_{\Pi} = \frac{F}{V}, \quad (1.1)$$

где F – поверхность конструкции, м²; V – объем материалов конструкции, м³.

По данному показателю конструкции делятся на массивные $M_{\Pi} \leq 6$; средней массивности $M_{\Pi} = 6-20$; легкие $M_{\Pi} > 20$.

Для конструкции с $M_{\Pi} < 6$ активно применяют метод «термоса»; глиноземистый цемент с добавками-ускорителями рекомендуется при $M_{\Pi} = 6...10$; электропрогрев для конструкции – с $M_{\Pi} = 5...20$ и т. д.

Три последних способа объединяет в одну группу общее их свойство: любой из них не ставит задачу форсированного набора прочности. Их задача – обеспечить получение критической прочности, и отсюда – все технологические приемы, характерные для такого подхода (табл. 1.1) [87].

Таблица 1.1

Выбор экономичного метода выдерживания бетона при зимнем бетонировании монолитных конструкций

Вид конструкции	Метод бетонирования	Минимальная температура, °С
Массивные бетонные и железобетонные фундаменты, блоки и плиты с $M_n < 3$	Термос	-15
	Термос с применением ускорителей твердения бетона	-25
	Термос с применением противоморозных добавок	-25
Фундаменты конструкции зданий и оборудование, массивные стены и т. п. $M_n 3...6$	Термос, в том числе с применением противоморозных добавок и ускорителей твердения	-15
	Обогрев в греющей опалубке	-25
	Предварительный разогрев бетонной смеси Обогрев в греющей опалубке, периферийный электропрогрев	-40
Колонны, балки, прогоны, ростверки, стены, перекрытия с $M_n 6...10$	Обогрев нагревательными проводами, индукционный нагрев	-15
	Обогрев в греющей опалубке, нагревательными проводами и ТАГП	-25
Полы, перегородки, плиты перекрытий, $M_n 10...20$	Обогрев в греющей опалубке	-40
	нагревательными проводами и ТАГП	-40

Следует отметить, что применение отдельных методов и принципов зимнего бетонирования находится в тесной связи с материаловедческой основой (видами цемента, их минералогическим составом, свойствами заполнителей, подвижностью смеси и др.) [46, 52, 81, 148, 149, 150].

Для расчетов требуемой мощности источников, характера формирующегося температурного поля, продолжительности остывания (слоя теплоизоляции) применяются расчеты по технологии организации и производства работ, методы математического моделирования, требуется владение информационными компьютерными технологиями [82, 85, 126].

Возможность быстрого получения качественных высокопрочных бетонных и железобетонных изделий с помощью тепловой обработки явилось основой его массового применения в строительстве и на заводах ЖБИ [104, 123, 133, 135].

Влияние температуры на процесс твердения бетона обуславливается изменением химической активности воды. С повышением температуры она увеличивается и процесс гидратации ускоряется. Становится ясно, что процесс гидратации цемента протекает посредством ряда сложных химических преобразований. Учитывая, что гидратация цемента относится к числу топохимических реакций, для его описания может быть применен базовый закон химии – уравнение Аррениуса, устанавливающее зависимость константы скорости химической реакции от температуры [122, 138, 139].

Достижение проектной прочности бетона при активной термообработке происходит в 20-30 раз быстрее, чем при температуре 20°C. При температурах твердения, достигающих 80-90 °C природные и искусственные минеральные добавки приобретают свойства активных вяжущих [51, 72].

В условиях зимнего бетонирования на строительной площадке, эффективным способом обогрева является электродный электропрогрев. Принцип его работы обусловлен использованием свежееуложенного бетона, как элемента сопротивления. Данный метод электропрогрева экономически

выгоден, т.к. тепло генерируется внутри бетона и максимально расходуется на его нагрев. К недостаткам электродного прогрева можно отнести негативное влияние степени армированности конструкции, которое может привести к неравномерности электропрогрева бетона.[104, 105].

Привлекательным с точки зрения экономической эффективности является метод предварительного электроразогрева. Длительность разогрева обычно не превышает 15 минут, что значительно снижает внешние теплопотери. После этого разогретая смесь укладывается в опалубку с теплоизоляцией и твердеет за счет полученной высокой температуры и экзотермии цемента методом «термоса». К недостаткам данного способа можно отнести невозможность его применения в конструкциях, где функцию опалубки несут охлаждающие поверхности [31, 32, 73].

Широко распространен в современном строительстве обогрев нагревательными проводами. Греющие провода, представляющие собой стальную жилу в гибкой изоляции, укладываются непосредственно в конструкцию перед бетонированием. Становится ясно, что греющий провод относится к внутренним источникам тепла. Применение данного метода не зависит от вида конструкции, модуля поверхности, насыщенности арматурой. К недостаткам нагревательных проводов можно отнести невозможность его применения для отогрева охлажденных поверхностей железобетонных конструкций. [83, 84, 97, 98, 104].

На сегодняшний день в зимнем строительстве интенсивно развиваются методы обогрева бетона с применением наружных источников тепла. Наиболее известными из них являются греющие опалубки и маты. Применение греющих матов чаще обусловлено необходимостью поддержания постоянной температуры на железобетонных конструкциях с высоким модулем поверхности (монолитные перекрытия, панели и т.д.). греющие элементы мата (металлические сетки, провод) изолируются гибким токоизолирующим материалом (брезент, резина). Значительные теплопотери

в окружающую среду компенсируются дополнительной теплоизоляцией [98, 99].

Греющие опалубки представляют из конструкцию в виде утепленной палубы, с укрепленными на внутренней её поверхности источника тепла. В качестве нагревателей применяется греющий провод или плоские элементы, проклеенные через слой электроизоляции на палубу. Температура на поверхности палубы равномерно распределяется по прогреваемой площади бетона с минимальным градиентом температур по поверхности [86].

Прогрев бетона наружными источниками тепла отличается удобством и технологической эффективностью при возведении любых конструкций вне зависимости от густоты армирования [104]. Особым преимуществом данного метода обогрева является возможность равномерного прогрева бетона по всей площади конструкции, снижающего вероятность появления микротрещин и внутренних напряжений в бетоне. Исходящее от источника тепло проникает в тело бетона и предотвращает локальный нагрев смеси. Кроме того, применение наружных источников тепла позволяет практически исключить возможность промерзания бетона, как например, при выходе из строя греющих элементов, находящихся в теле бетона. Универсальность технологии использования наружных источников тепла позволяет отогреть замерзшую железобетонную практически любого модуля поверхности.

Кроме низкотемпературных наружных источников нагревателей также известны высокотемпературные в виде инфракрасных, силитовых и других излучателей. Технологическая сложность, требования к безопасности и высокие энергетические затраты обуславливают его редкое применение в условиях современного строительства

При заделке стыков железобетонных конструкций, имеющих зоны с повышенной армированностью, целесообразно использовать индукционный прогрев. Индуктор нагревает арматуру в заделке, а также в зоне стыкуемых железобетонных элементов. Также следует учитывать, что при использовании стальной опалубки при индукционном прогреве происходит

экранирование электромагнитного поля и от нагревающейся палубы происходит нагрев бетона [87, 104]. Возможности этого способа электротепловой обработки применительно к условиям строительной отрасли еще недостаточно изучены, однако существующие сведения дают основание полагать, что такое направление научно-технического прогресса следует рассматривать, как весьма перспективное [104, 139].

При замоноличивании стыков колонн в зимних условиях для ускорения твердения раствора рекомендуется электропрогрев с помощью:

греющих опалубок или гибких матов на основе сетчатых и пластинчатых электронагревателей (рис. 1.8.);

плоских закладываемых в шов арматурных сеток и спиралей (рис.1.9), навитых на концы колонн (индукционный прогрев).

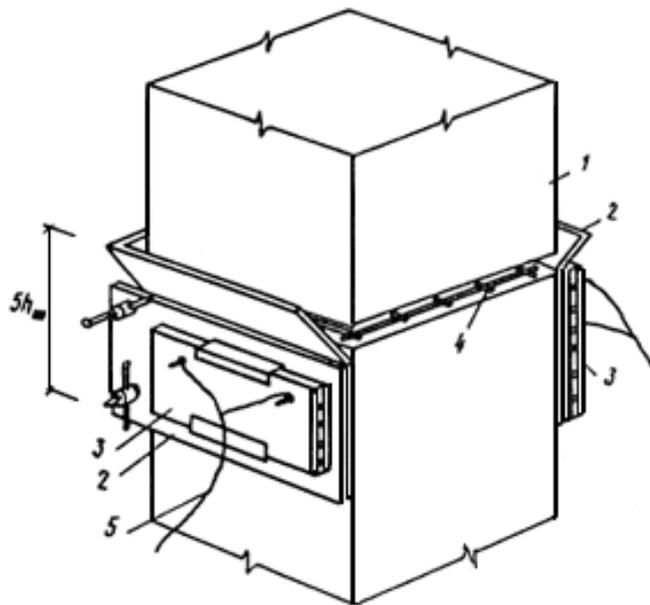


Рис. 1.8. Схема термоэлектрической опалубки с сеткой для прогрева раствора замоноличивания: 1 - колонна; 2 - стальная опалубка; 3 - греющий элемент со спиралью; 4 - сетка; 5 - электроподводка

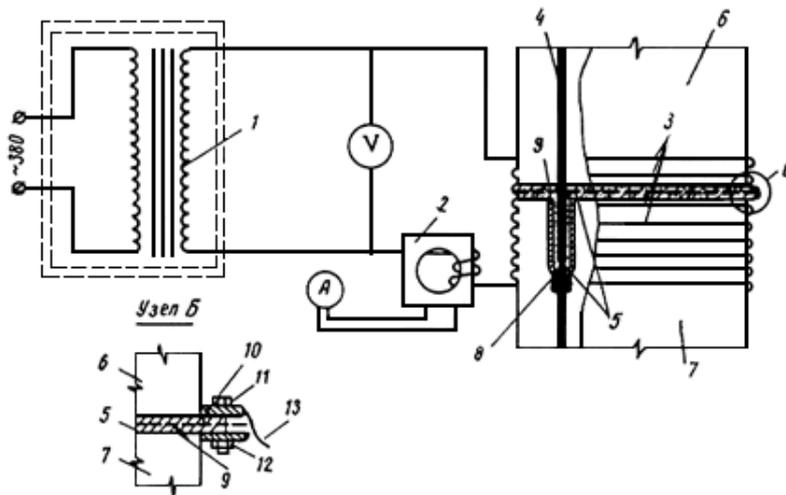


Рис. 1.9. Комбинированный электропрогрев клевого стыка с анкерровкой выпусков арматуры: 1, 2 - трансформаторы тока; 3 - обмотка индуктора; 4 - рабочая арматура; 5 - полимерраствор; 6 и 7 - соответственно верхний и нижний элементы колонны; 8 - место сварки рабочей арматуры со стальной трубкой; 9 - нагревательный элемент (сварная сетка); 10 - медная полушина; 11 - болт; 12 - гайка и шайба; 13 - провод с клеммами

Рекомендуется также предварительный обогрев стыкуемых элементов колонны до начала бетонирования путем включения в электрическую цепь различных обогревающих устройств. Укладку раствора следует производить при температуре стыка не ниже $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температуре наружного воздуха ниже минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ опалубку целесообразно утеплять матами. Особое внимание следует уделять утеплению емкостей с раствором [97].

Тепловую обработку бетона замоноличивания рекомендуется производить при скорости подъема температуры $v \leq 30\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$. Максимальная температура и продолжительность электропрогрева зависят от вида цемента и назначаются строительной лабораторией.

Контроль за производством работ по электрообогреву раствора при замоноличивании, расчет и выбор оборудования, его параметров и режимов работы следует осуществлять в соответствии с рекомендациями [97, 104].

1.3. Методы исследования температурных условий твердения бетонных смесей при использовании электрообогрева.

Для получения качественного бетона важно поддерживать его в нужной консистенции и контролировать процесс нагревания [63, 67, 111]. Это связано с изменением физико-механических свойств материала с течением времени.

Обеспечение требуемого качества строительных конструкций из тяжелого бетона и железобетона требует оперативной информации о динамике изменения его температурных показателей в контрольных точках. Именно увеличение температуры оказывает важнейшее влияние на кинетику ранней прочности бетона в условиях всесезонного возведения монолитных или сборно-монолитных сооружений [87, 104, 139].

Важнейшей операцией, обеспечивающей благоприятный режим процесса твердения бетонных конструкций в условиях отрицательных температур, является мониторинговый контроль температуры бетона. [27, 28, 111].

Зимнее, монолитное и сборно-монолитное строительство сегодня обеспечивает высокий темп возведения зданий. В таком случае необходима организация ускоренного обогрева бетона, а также постоянного контроля его прочности, особенно в течение первых 2 суток. Данных о температуре твердения бетона, полученные в этот период времени, помогут в принятии оперативные решения по остановке или продолжению процесса обогрева, распалубливания конструкции и возможному дополнительному догреву [63, 111].

В общем случае требуется контролировать максимальные скорости разогрева/остывания, максимальную температуру разогрева (прогрева), температурные перепады бетон-воздух и однородность температурного поля в объеме материала железобетонных конструкций [67].

На строительстве должно быть обеспечено систематическое получение ежедневных метеорологических сведений и краткосрочных прогнозов по температуре наружного воздуха, силе и направлении ветра, осадкам. Не реже 2-х раз в смену фиксируется температура поступившей бетонной смеси [63, 67, 111].

В процессе укладки бетонной смеси в опалубку измеряют температуру уложенного бетона на глубине 5 см. Если температура уложенного слоя бетона опускается ниже 5 °С, на его поверхность временно укладывается слой теплоизоляции, либо подается напряжение на греющие устройства и осуществляется обогрев бетона в процессе бетонирования [104, 105, 111].

Температурный контроль в процессе активного прогрева бетона следует осуществлять дистанционно термодатчиками или безынерционными термодатчиками, устанавливаемыми в бетоне после его укладки. В качестве вторичного прибора следует использовать электронные мосты, потенциометры, влагомеры или программные регуляторы температуры. При отсутствии указанных приборов допускается осуществлять контроль температуры обычными техническими термометрами, закладываемыми в специальные скважины. Технические термометры следует применять со шкалой до 100 °С и длиной хвостовой части до 10 см [63, 111].

На протяжении всех периодов активного прогрева бетона термометры должны находиться в температурных скважинах, которые устраиваются в бетоне в соответствии с указаниями в технологической карте.

Температурные скважины следует устраивать в случае двухстороннего прогрева на стыках греющих опалубок, в случае одностороннего прогрева – в центре не обогреваемой поверхности. Скважины устраиваются в средней (по высоте) части обогреваемой конструкции [63]. Мониторинг температур проводится в точках, с наибольшими показателями разности температур (углы, промежуточные и средняя часть конструкции).

Если количества термометров недостаточно для установки их во всех скважинах допускается переставлять термометр из одной скважины в

другую. В таком случае показания с термометра снимается не раньше истечения 3 минут с момента его переустановки. Скважина, где отсутствует термометр, закрывает теплоизоляционной пробкой. Количество точек измерения температуры бетона в конструкции должно быть достаточным для получения полной информации и показаний температуры в разных частях. В зависимости от множества факторов (массивность конструкции, температура и др.), количество точек устанавливается проектом производства работ совместно с построечной лабораторией [111].

Ориентировочно должно быть не менее одной точки измерения температуры на каждые 3 м бетона, на 6 м длины конструкции, на 50 м опалубки, щитов и гибких покрывал [97].

Температуру бетона контролируется не реже чем в следующие сроки:

- в процессе укладки бетона в зимнее время вне отапливаемого помещения и в период подъема температуры со скоростью 10-20 °С/ч - через 30 мин, а со скоростью менее 10 °С/ч – через 1 ч;
- в период изотермического прогрева конструкций с модулем поверхности 12 м⁻¹ и выше - через 1 ч., а с модулем поверхности менее 12 м⁻¹ - через 2 ч.;
- во время термосного выдерживания или остывания конструкций с модулем поверхности 12 м⁻¹ и св. – два раза в смену, а с модулем поверхности менее 12 м⁻¹ – один раз в смену [97].

Технические термометры состоят из электронного дисплея и чувствительного элемента – измерительного щупа. Производится несколько видов: комплектный; инфракрасный; биметаллический; беспроводной; термометр для прогрева бетона.

Комплектные представляют собой набор устройств, применяемых для контроля температурного режима в нескольких точках одновременно. Прибор имеет десятиметровый провод и два датчика. Обычно один из них погружают в бетонную смесь, а второй устанавливают на опалубке, обеспечивая высокую прочность и яркость индикатора показаний.

Инфракрасные термометры позволяют проводить замеры дистанционно. Нагретые тела излучают тепло, которое пропорционально их температуре. Принцип действия бесконтактных приборов состоит в регистрации этого излучения фотографическим или фотоэлектрическим методом. Наиболее известными примерами таких устройств могут служить тепловизоры и пирометры, применяемые для промежуточного и регулярного измерения соответственно. Считается, что этот вид менее надёжен и может использоваться только совместно с другими приборами. Но новые модели, выпускаемые в последнее время, являются более точными [63, 67, 111].

Биметаллический термометр для бетона, кроме строительства, находит применение и в остальных хозяйственных целях. Его также называют игольчатым из-за метровых щупов в виде иглы [63, 111].

Беспроводные аппараты отличаются удобством и практичностью благодаря управлению ими через Интернет. Они определяют не только температурные показатели бетона, но и его плотность, а данные отправляют в компьютер. Преимуществом этого типа является возможность не присутствовать в проверяемой зоне и тем самым экономить время на регулирующий процесс. Прибор контроля прогрева бетона используется в зимнее время, когда из-за холода происходит изменение технических характеристик бетонной смеси. Прогрев бетона обеспечивает сохранение свойств раствора и качество стройки [63, 104, 105].

Основной причиной неблагоприятного положения дел с температурным контролем на стройках является отсутствие современного удобного в эксплуатации приборного обеспечения. При этом главную проблему представляет задача практической реализации нужного объёма измерений с должной оперативностью, надёжностью и объективностью.

Эффективное решение этой проблемы заключается в размещении неприхотливых регистраторов, и устройств, не требующих прокладки каких-либо сигнальных и питающих кабелей, в контрольных точках монолитных конструкций на все время тепловой обработки и выдерживания либо

непосредственно в бетоне, либо на опалубке. Установка регистраторов может происходить заблаговременно или после бетонирования. В ходе выдерживания бетонной конструкции термометрист оснащается специальным прибором-накопителем информационных копий памяти регистраторов, например, транспортером, считывателем данных или минитранспортёром. Тогда он может с заданной периодичностью производить обход логгеров, расположенных в определенных техническим регламентом контрольных точках строительной конструкции, и выполнять считывание накопленных ими регистрационных данных. Для осуществления такой операции ему достаточно коснуться корпуса устройства специальным щупом или зондом прибора накопителя, и вся информация, хранящаяся в памяти логгера, будет перемещена и сохранена в памяти прибора-накопителя. После того как температурные данные, накопленные всеми регистраторами, они могут быть считаны в виде текстовых или кодовых файлов непосредственно в память стационарного компьютера с помощью специальной программы. Эта операция выполняется уже в офисе персоналом, обладающим более высокой квалификацией, чем термометрист. После считывания информации из памяти прибора-накопителя и его подготовки к новому обходу, он может быть снова передан термометристу для выполнения следующего задания по обслуживанию логгеров в контрольных точках строительного объекта.

Обработка результатов температурных измерений в системе происходит с помощью компьютера, установленного непосредственно на строительной площадке. Программа обеспечивает ведение температурных листов в электронном виде с автоматическим расчетным определением прочности бетона в наблюдаемых точках. При этом производится построение графиков изменения температуры, полный анализ температурных критериев выдерживания бетона на предмет их соответствия существующим правилам и требованиям, вычленение неблагополучных ситуаций. Наилучшим образом решено оформление документации контроля, формирование сводок и

заклучений, как в электронном, так и в бумажном виде. Особого упоминания заслуживают используемые в программе методы статистической обработки результатов, позволяющие получать информацию, совершенно недоступную при традиционном контроле. Прежде всего, это группировки температурных показателей по различным видам конструкций и периодам выдерживания. Крайне эффективно работает принцип статистической настройки расчетных показателей прочности по данным операционного и приемочного неразрушающего контроля, обязательного при возведении монолитных зданий [86].

Определение температуры в теле обогреваемого бетона необходимо для выяснения равномерности распределения теплового потока от греющих элементов. При отрицательных температурах, в частности, при зимнем бетонировании, распространенном на большей части территории Российской Федерации, необходимо учитывать необратимые теплотери при обогреве бетона, а также скорость распространения тепла в толще бетона, которые влияют на скорость его твердения и прочностные характеристики.

Наиболее информативным способом определения температуры в теле бетона является способ комплексного определения теплофизических свойств материалов, который включает измерение толщины образца, установка температуры на внешних поверхностях образцов, равной заданной температуре. На данном этапе определяют удельную мощность источника теплоты и измеряют с постоянным шагом во времени температуру в течении всего опыта. Определяют на каждом шаге величину динамического параметра и сравнивают с максимальным значением, лежащем в заданном диапазоне. На первом этапе эксперимента подводят постоянную мощность к объемному источнику теплоты и по зарегистрированным данным вычисляют искомую теплопроводность. На втором этапе прекращают подвод мощности к объемному источнику теплоты и по зарегистрированным данным определяют теплопроводность. Однако, при обогреве бетонных конструкций практически не уделяется внимания процессам изменения температуры в

объеме материала, что может привести к появлению деструктивных напряжений в теле бетона.

Таким образом, налицо существование серьезной инженерно-технической проблемы в сфере сборно-монолитного строительства – осуществление измерения температуры в объеме материала железобетонных изделий в зоне штепсельного соединения в ходе электротепловой обработки, изменение её скорости при изменении температуры окружающего воздуха, вида и режима прогрева, а также непрерывный температурный мониторинг исследуемого образца по всему объему в течение всего времени обогрева. Одновременно, крайне желательно обеспечить автоматизированные обработку результатов измерения параметров процесса такой обработки и управление этим процессом в режиме онлайн с выходом в Интернет.

Приведенная выше информация позволяет сделать также вывод о наличии еще одной, возможно еще более важной, проблемы в сфере сборно-монолитного строительства – это острая потребность в достоверных методиках расчета характеристик температурных полей в объеме материала в зоне штепсельных соединений в процессе их электротепловой обработки. Наличие таких методик позволило бы, используя методы компьютерного моделирования, всесторонне исследовать характеристики таких температурных полей и на этой основе, еще на стадии разработки технологических процессов, выбирать рациональные режимы электротепловой обработки штепсельных соединений и создавать эффективное оборудование для такой обработки без использования длительных и дорогостоящих экспериментальных исследований.

В настоящее время такие расчетные методики применительно к тепловой обработке штепсельных соединений практически отсутствуют. Теоретической основой создания этих расчетных методик может стать общая методология разработки и применения процессов электротепловой обработки бетона и железобетонных изделий токами повышенной частоты, которая получила развитие последние годы [109, 127, 137, 138]. Как показано в [109,

127, 139], 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 необратимого 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.

Указанная методология не располагает какими-то универсальными методиками расчета характеристик температурных полей в изделиях при их электротепловой обработке, а предоставляет принципиальную основу, базирующуюся на современных представлениях о тепло- массопереносе, для разработки таких методик применительно к изготовлению конкретных железобетонных изделий или условиям их изготовления. Эти методики по мере их создания и разработки программно-алгоритмической реализации пополняют библиотеку расчетных методик общей методологии.

Следует отметить, что существуют сложные численные методы расчета характеристик температурного поля в объеме железобетонных изделий [82]. Однако их применение требует от пользователя высокой квалификации, специальной подготовки и большого объема работ по программированию и отладке программ. Для широкого круга специалистов они малопригодны. Для них необходимы достаточно простые и наглядные расчетные методики, обладающие, тем не менее, высокой точностью.

Вполне очевидно, что в рамках настоящей работы возникает актуальная задача разработки методик расчета характеристик температурных

полей в объеме железобетонных изделий при электротепловой обработке штепсельных соединений, а также их программно-алгоритмической реализации на указанной принципиальной основе. Причем эти методики должны обеспечивать исследование характеристик температурных полей как в поперечном сечении изделий (железобетонных колонн), так и в их продольном сечении.

1.4. Типы, показатели, характеристики материалов, используемых для заполнения штепсельных стыков

В зависимости от предъявляемых требований [103] в качестве штепсельных стыков сборных железобетонных колонн используются следующие виды растворных смесей:

- полимеррастворы: эпоксидные и полиэфирные;
- бездобавочные цементно-песчаные;
- цементно-песчаные на расширяющихся цементах;
- модифицированные цементно-песчаные.

В практике отечественного и зарубежного строительства свое место нашли стыки сборных железобетонных колонн, выполняемые с использованием полимеррастворов. В качестве полимеррастворов применяются в большинстве случаев эпоксидные составы, реже полиэфирные [81].

При склеивании эпоксидным клеем торцов колонн прочность шва оказывается выше прочности соединяемых элементов, что было подтверждено многочисленными испытаниями конструкций стыков на растяжение, изгиб и срез. При этом разрушение экспериментальных конструкций происходило не по клеевому шву, а по телу колонны. Клеевые стыки обладают не только большой прочностью, но и высокой коррозионной

стойкостью. Тонкие клеевые швы требуют большой точности изготовления и монтажа, что отражается на величине допусков.

При необходимости компенсации больших допусков (10-20 мм) швы заполняются полимеррастворами, применение которых обеспечивает лучшее упрочнение зоны соединения колонн и меньшую деформативность шва по сравнению с растворами на основе цемента.

Эпоксидные составы также нашли свое место для соединения арматуры в стыках сборных железобетонных конструкций, которые могут быть выполнены в трубках, на муфтах, заполненных полимерраствором. Недостатком полимеррастворов является их малая огнестойкость, который может быть исключен путем устройства по контуру шва цементно-гипсовой обмазки [53].

Для замоноличивания контактных стыков колонн рекомендуется применять полимеррастворы на эпоксидных (табл. 1.2) и полиэфирных (табл. 1.3) смолах, на полиэфиракрилатном связующем (табл. 1.4).

Таблица 1.2

Составы смесей на эпоксидных смолах для замоноличивания контактных стыков

Компоненты смеси*	Состав, мас.ч.					
	1	2	3	4	5	
	для летних условий			для зимних условий (до -15 °С)		
Эпоксидная смола марок ЭД-16, ЭД-22, ЭИС-1	100	100	100	100	100	
Отвердители: (полиэтиленполиамин, триэтанолламин, диэтиленамин)	10-20	10-20	-	-	17-30	
Аминофенол АФ-2	-	-	-	35-40	-	
Модификатор - фенольная смола	-	30-50	30-50	-	30-50	
Ускоритель комплексный ВГз	-	-	-	-	0,8-2,0	
Наполнитель:	кварцевый песок	200-500	200-500	200-500	200-250	100-300
	минеральная мука	100-150	100-150	100-150	100-150	-

* Отношение смолы к наполнителю (Э:Н) рекомендуется принимать: для растворов, предназначенных для укладки на торец, - равным Э:Н=1:2-1:6,5); для инъекционных растворов - Э:Н=1:1 или Э:Н=1:2.

Таблица 1.3

Составы смесей на полиэфирных смолах для замоноличивания контактных стыков

Компоненты смеси*	Состав, мас.ч.	
	8	9
	для летних условий	для зимних условий
Полиэфирная смола ПН-1	100	100
Гипериз	6	6
Нефтанат кобальта	8	4
Полиизоцианат К (кубовый остаток)	40	40
Наполнитель (андезит, диабазэ)	100-280	100-150
Диаметиланилин	-	0,5

* См. сноску под табл.1.2

Таблица 1.4

Составы смесей на полиэфиракрилатном связующем для замоноличивания контактных стыков

Компоненты смеси*	Состав, мас.ч.		
	10	11	
	для летних условий	для зимних условий	
Метилметакрилат	100	100	
Полиэфирная смола МГФ-9	100	100	
Гипериз	4	4	
Нафтенат кобальта	2	2	
Полиэтиленполиамин	6	6	
Порофор ЧХЗ	-	2	
Наполнители:	кварцевый песок	100-400	100-400
	минеральная мука	200	200

* См. сноску под табл.1.

При использовании для замоноличивания стыков композиций на основе эпоксидных смол торцовые поверхности стыкуемых элементов необходимо предварительно прогрунтовать составом, указанным в табл. 1.5 [103].

Таблица 1.5

Состав для предварительного прогрунтования торцевых поверхностей стыкуемых элементов при использовании составов на основе эпоксидных смол

Компоненты смеси*	Состав 12, мас.ч., для грунтовки торцов
Эпоксидная смола	100
Полиэтиленполиамин	10
Растворитель (ацетон, толуол)	50

* См. сноску под табл.1.

При производстве монтажных работ в зимнее время при температуре не ниже $t = -15$ °С для замоноличивания стыков рекомендуются составы номер 4, 5, 9 и 11 (см. табл.1.2, 1.3 и 1.4) [103].

В проектных решениях обычно используют цементно-песчаные растворы с добавками, приведенные в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Таблица применяемых цементно-песчаных растворов

№	Компоненты смеси	Состав, мас.ч.
1	песок (класс - мелкий)	1 ч.
2	цемент класса 42,5	1 ч.
3	Химические модификаторы	0,7% от массы цемента
4	вода	Не выше 0,4 ч

Для приготовления бетонов или растворов применяют портландцементы класса В32,5 и выше. Целесообразно применять бетонную смесь на расширяющиеся или быстротвердеющем цементе.

Результаты испытаний при использовании подобных составов (табл. 1.6) показали удовлетворительную прочность стыков при действии сжимающих усилий, практически нулевое сопротивление растягивающим усилиям, сжимающим усилиям, низкую прочность при сдвиге из-за «смятия» раствора под арматурными стержнями. Последнее указывает на полное отсутствие сцепления между бетоном скважин и раствором, необходимость использования растворов более высоких марок [1].

В эксперименте [1] использовался цементно-песчаный раствор состава: Ц:П:В = 1:3:0,45 с добавлением 0,8% суперпластификатора С-3, эпоксидная смола ЭД-20 -100 масс.ч, отвердитель полиэтиленполиамин – 12-17 масс.ч, дибутилфталат – 30-50 масс.ч, наполнитель кварцевый песок – 60-70 масс.ч. Результаты показали, что применение полимерраствора в качестве материала заполнения горизонтального шва и скважины увеличило прочность и уменьшило податливость образцов, по сравнению со стыками замоноличенными цементно-песчаным раствором.

Согласно нормативной документации смеси для заполнения штепсельных стыков должны быть по типу бетона мелкозернистыми, в зависимости от показателя удобоукладываемости растекающимися [59].

Подбор составов бетона или раствора производят с учетом обеспечения им заданной прочности и других свойств, предусмотренных проектом, в установленные сроки при наименьшем расходе цемента. Класс бетона или раствора указывают в примечаниях рабочих чертежей. Исходя из заданного класса на строительной площадке определяют состав смеси: количественное соотношение цемента, песка, крупного заполнителя и воды с учетом имеющихся материалов. Подбор производят выполнением пробных замесов и испытанием изготовленных из них образцов [68, 69].

Так как бетонный раствор имеет в своем составе некие пустоты в виде частиц растворимой в нём воды, при высыхании смеси и испарении воды на воздухе образуются пустоты, в которые распределяется раствор под действием собственной массы (то есть происходит самоуплотнение). В результате мы получаем осевший бетон. Но причиной усадки может являться не только вода в составе. Капиллярные силы в структуре цемента также могут повлиять. Когда жидкость испаряется из капилляров материала, они сужаются, уплотняя при этом структуру бетона. Обобщая эти причины, можно утверждать, что влага – это основной компонент эффекта усадки [78, 79, 118].

Так как же повлиять на это свойство и не допустить разрушения или брака конструкции. Существует ряд методов для устранения или уменьшения усадки с целью недопущения разрушения (брака) бетонизируемых конструкций:

- состава бетонной смеси (наличие плотных заполнителей и уменьшение качественный контроль количества пористых снижают возможность усадки бетона);
- количественный контроль состава (чем больше заполнителей и меньше цементного камня, тем меньше усадка);

- применение цементов алитового типа (вливают на химическое взаимодействие цемента и воды, уменьшая усадку) [118].

Однако по качественному составу заполнителей есть момент, который нужно учесть. В случае если вероятно появление усадочных напряжений, желательно использовать именно пористые заполнители в поддержание целостности цементного камня и во избежание трещин. Сейчас также применяются особые составы цементов, которые при реакции с водой начинают расширяться, тем самым компенсируя уплотнение, уменьшение объёма и сводят усадку к минимуму [118].

Согласно нормативной документации [50] при использовании цементно-песчаных растворов при омоноличивании стыков необходимо учесть следующие моменты:

- для обеспечения подвижности бетонной смеси и улучшения её физико-механических свойств (прочности, водонепроницаемости), рекомендуется применять суперпластификатор С-3 [102].

- количество суперпластификатора С-3 составляет 0,2-1,2 % от массы цемента [50].

- рекомендуется применять модификаторы и цементы, снижающие усадочные деформации бетонных смесей и растворов [50].

Учитывая, что процесс омоноличивания штепсельных стыков может вестись через заливной канал (в случае с обратным стыком), представляется затруднительным его заполнение растворами, имеющими высокую вязкость и сравнительно низкую текучесть. В любом случае данный процесс усложнится необходимостью применения компрессорного оборудования для создания необходимого давления подачи смеси. В таком случае может возникнуть опасность появления незаполненных участков (воздушных пробок) в стыке. На сегодняшний день представляется целесообразным применения новых мелкозернистых самоуплотняющихся растворных смесей с пластифицирующими добавками на основе поликарбоксилатного эфира,

снижающими водопотребность до 30% и обеспечивающими низкую усадку бетона.

1.5. Выводы по главе 1, постановка цели и задач диссертационного исследования

Анализ сведений, приведенных в настоящей главе, позволяет сделать следующие выводы.

1. Одним из наиболее сложных элементов технологии возведения сборно-монолитных сооружений является получение прочных и надежных штепсельных соединений в процессе монтажа сборно-монолитных конструкций, а при пониженных и отрицательных температурах окружающего воздуха решение этой задачи существенно осложняется и требует квалифицированного применения различных способов тепловой обработки штепсельного соединения; причем именно в этом узле наиболее часто возникают дефекты вследствие нарушения технологии (в том числе и тепловой обработки), требующие сложного и дорогостоящего ремонта.
2. В настоящее время из всех видов и способов тепловой обработки для получения надежных штепсельных соединений наиболее простым, удобным и эффективным следует признать электротепловую обработку с помощью поверхностного электропрогрева в сочетании с установкой теплоизоляции с наружной стороны нагревателей и на поверхности железобетонных изделий в зоне, подвергаемой электротепловой обработке.
3. При разработке и осуществлении процессов электротепловой обработки штепсельных соединений решающее значение имеет знание характеристик температурного поля в объеме материала в зоне тепловой обработки: изменение в пространстве и во времени значений температуры и градиентов температуры, что позволяет определять температурные условия твердения бетона и оценивать возможность недопустимого

повреждения материала внутренними механическими напряжениями, вызванных наличием градиентов температуры; эти сведения позволяют квалифицированно выбирать рациональные и безопасные режимы электротепловой обработки и создавать эффективное оборудование для такой обработки.

4. Существует настоятельная потребность в разработке достаточно простых, удобных и наглядных инженерных методик расчета и исследования характеристик нестационарных температурных полей в объеме материала области штепсельных соединений в процессе их электротепловой обработки с помощью поверхностного электропрогрева, доступных широкому кругу пользователей, а также их программно-алгоритмической реализации.
5. Актуальной задачей процесса электротепловой обработки штепсельных соединений является создание эффективных автоматизированных систем контроля температурных параметров этого процесса, обработки результатов и управления этим процессом.
6. Несмотря на большой объем информации и научно-технических разработок в сфере материалов, предназначенных для заполнения полости штепсельных стыков при изготовлении штепсельных соединений, существует ряд задач по совершенствованию рецептуры таких материалов и технологии их подготовки и применения в целях достижения наилучших характеристик и показателей таких материалов при использовании их для изготовления надежных и прочных штепсельных соединений; необходимо проведение серии экспериментальных исследований для решения этих задач.
7. Получение прочных и надежных штепсельных соединений при монтаже сборно-монолитных строительных конструкций представляет собой задачу, решение которой требует комплексного подхода и включает в себя ряд неотделимых друг от друга аспектов: разработка и соблюдение процедуры (технологии) предварительной подготовки железобетонных

изделий, скрепляемых с помощью штепсельного соединения, тщательное предварительное исследование характеристик температурных полей и контроль температурных режимов в объеме материала железобетонных изделий в процессе электротепловой обработки штепсельных соединений, уточнение рецептуры составов, предназначенных для укладки штепсельные стыки, а также исследование свойств и характеристик этих составов применительно к их использованию в штепсельных соединениях с учетом условий электротепловой обработки, создание и применение автоматизированных систем контроля параметров, обработки информации и управления процессом электротепловой обработки и др.

Представленные выводы позволяют сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

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

Задачи исследования:

1. Разработать инженерную методику 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.
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 электротепловой обработки штепсельных соединений этих изделий как в области штепсельных соединений (прогреваемой области), так и за ее пределами.

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 с помощью этой лабораторной установки в целях проверки достоверности предложенных в настоящей работе расчетных методик, получения дополнительной информации и уточнению рекомендаций по применению электротепловой обработки в производственных условиях.
5. Выполнить экспериментальные исследования составов, предназначенных для заполнения стыков при изготовлении штепсельных соединений в целях уточнения рецептуры этих составов, определения их различных 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.

ГЛАВА 2. Разработка теоретических вопросов процесса электротермической обработки при получении штепсельного соединения железобетонных колонн

Как показывают исследования [60, 89, 124, 127, 128, 129, 130, 131, 138, 139], выполненные в последние годы, при использовании электротепловой (электротермической) обработки железобетонных изделий и конструкций решающее значение имеют сведения о характеристиках температурных полей в объеме материала обрабатываемых железобетонных изделий в процессе такой обработки. Такие сведения можно получить только посредством расчетов на основе современных представлений и теории теплопереноса. Практически единственным способом выполнения подобных расчетов является применение сложных численных методов, требующих от пользователя наличия специальной подготовки и высокой квалификации [61, 82, 109, 123, 126, 131]. Поэтому весьма актуальной является задача разработки сравнительно простых расчетных методик, доступных широкому кругу специалистов и позволяющих всесторонне исследовать характеристики температурных полей в области штепсельных соединений в целях разработки рациональных режимов электротепловой обработки таких узлов, а также необходимого для такой обработки оборудования. Однако даже грамотное применение процессов электротепловой обработки не дает полной гарантии получения надежного штепсельного соединения. Для достижения такого результата требуется решение ряда сопутствующих вопросов, которые также рассмотрены в настоящей главе. Таким образом, к разработке процесса электротепловой обработки применяется комплексный подход, когда эта обработка рассматривается как важнейшая составная часть технологии получения качественного и надежного штепсельного соединения, неразрывно связанной с остальными составляющими и этапами этой технологии.

2.1. Стадии процесса и условия получения штепсельных соединений железобетонных колонн с применением электротермической обработки

Монолитное бетонирование и сборно-монолитное строительство в зимних условиях затруднено. С наличием дополнительных трудозатрат, сроки строительства удлиняются, стоимость производства работ увеличивается и в зависимости от фактической температуры до 6 % общей стоимости стройки. Учитывая значительную продолжительность времени пониженных и отрицательных температур в течение года средней полосы Российской Федерации, эффективным решением проблем монолитного и сборно-монолитного строительства является применение тепловой обработки соответствующих узлов и элементов возводимых конструкций. К наиболее распространенным разновидностям такой обработки относятся, в первую очередь, различные варианты электропрогрева. При этом необходимо обязательно отметить ряд общих правил и требований по выполнению монтажных работ сборно-монолитного строительства с применением электротепловой обработки, не соблюдение которых может привести к получению отрицательных последствий.

Готовые железобетонные изделия предварительно очищаются от мусора, грязи и льда. Во время хранения изделия не должны подвергаться воздействию атмосферных осадков, глухие и сквозные отверстия плит и колонн предварительно закрываются гидроизолирующими материалами. Наледь с поверхности конструкции удаляют механическим (металлические щетки), тепловым (газовые горелки, электропушки) способом.

После проведения данных мероприятий колонны подаются на место установки и предварительно закрепляются с помощью кондукторов или регулировочных стоек, укосин. После проверки вертикальности положения конструкции, место стыка колонн омоноличивается раствором. Установка

ригеле и плит происходит после достижения бетоном стыка 70 % проектной прочности.

Комплекс необходимых мер по предотвращению замерзания бетона штепсельного стыка состоит из:

- отогрева стыкуемой поверхности до температуры + 5...8 °С;
- укладкой бетонной смеси в конструкцию с предварительным подогревом до +30...40 °С;
- выдерживания уложенной бетонной смеси при положительной температуре до достижения 70 % проектной прочности [33, 110].

Стыки, воспринимающие расчетные усилия, замоноличивают раствором или бетоном состава, указанного в проекте (класс их не ниже класса конструкций), с предварительным прогревом стыка горячим воздухом и последующим выдерживанием бетона способом термоса или искусственным прогревом (чаще всего электропрогревом). Если проектом разрешено увеличение сроков строительства, то стыки замоноличивают бетонной смесью (раствором) с противоморозными добавками.

Для разработки и применения процессов электротепловой обработки железобетонных изделий необходимо знание характеристик температурного поля в объеме материала [127, 137]. 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 таких характеристик – оценка опасности повреждения материала внутренними напряжениями, вызванных градиентами температуры в его объеме, неизбежно возникающими в ходе тепловой обработки, а также устранение, при необходимости, этой опасности.

2.2. Методика расчета характеристик нестационарного температурного поля в объеме материала при наружном электропрогреве штепсельных соединений железобетонных колонн сборно-монолитных сооружений

Как известно, схема электротепловой обработки штепсельного соединения железобетонных колонн с помощью поверхностного электропрогрева выглядит достаточно просто: на две, как минимум, боковые противоположные вертикальные поверхности железобетонных колонн в области штепсельного соединения накладываются плоские электронагреватели, ширина которых равна ширине колонн, а высота – не менее длины штепсельных стыков. Поверхность колонн вместе с электронагревателями в области штепсельного соединения закрывается слоем теплоизоляционного материала. Затем на электронагреватели подается электрическое питание и происходит постепенный разогрев области штепсельного соединения. При этом задачу определения характеристик температурного поля в объеме материала можно разбить на две составляющие. Первая из них – это определение характеристик температурного поля в пространстве между электронагревателями в направлении прямой, соединяющей поверхности нагревателей и перпендикулярной этим поверхностям или, иначе, в поперечном сечении колонн [127]. Вторая – это расчет характеристик температурного поля вдоль оси колонн, т.е. в их продольном сечении, как в области штепсельного соединения, так и за его пределами [128].

2.2.1 Разработка методики расчета характеристик нестационарного температурного поля в области штепсельного соединения средствами программной среды MathCad

Основным способом определения характеристик температурного поля в объеме материала является решение дифференциального уравнения тепломассопереноса в трехмерном пространстве [138, 139]

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T(x, y, z, t), \quad (2.1)$$

где T – температура ($T = f(x, y, z, t)$), К; t – время, с; ∇^2 – оператор Лапласа; $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); c – удельная теплоёмкость материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³.

Как известно, решение уравнения (1) с учетом граничных условий представляет собой сложную задачу и обычно осуществляется применением численных методов, требующих от специалиста соответствующих знаний, специальной подготовки и большого объема работы по программированию и отладке вычислений [61, 82, 138, 139]. Причем наиболее сложным является расчет нестационарных температурных полей, возникающих на стадии нагревания материала до момента достижения стационарных значений температуры во всех точках его объема. Поэтому весьма актуальной является задача разработки инженерных методов исследования характеристик температурных полей в объеме обрабатываемых железобетонных изделий, доступных широкому кругу специалистов.

Процесс тепловой обработки штепсельного соединения с помощью наружного электрообогрева иллюстрирует рис. 2.1. Как следует из рис. 2.1, в процессе электротепловой обработки тепловые потоки от нагревателей, расположенных на противоположных поверхностях железобетонных колонн перпендикулярных осей, 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, как показывают количественные оценки, сквозь слой теплоизоляции превышает сопротивление тепловому потоку в толще бетона, как минимум, в 45÷55 раз [138]. 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 (рис. 2.1).

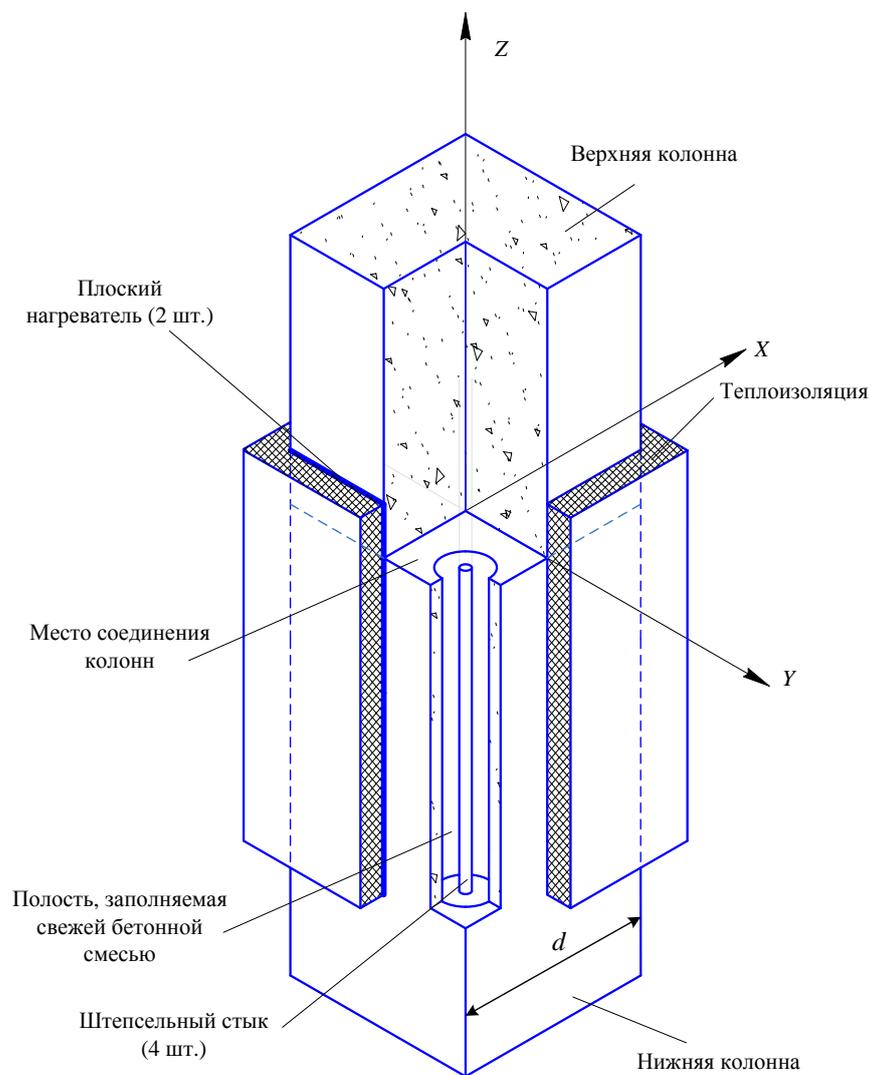


Рис. 2.1. Схема наружного электропрогрева штепсельного соединения железобетонных колонн

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

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0; \frac{\partial T}{\partial z} = 0. \quad (2.2)$$

В результате, уравнение (2.1) упрощается и приобретает вид

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}. \quad (2.3)$$

Таким образом, исследование нестационарного температурного поля в рассматриваемой конструкции (рис. 2.1) сводится к решению одномерного уравнения теплопереноса (2.3), а расчетная схема будет выглядеть, как показано на рис. 2.2. Особенностью этой схемы является то, что она учитывает неплотное прилегание поверхности нагревателя (алюминиевого листа) к поверхности бетона из-за ее шероховатости введением воздушной прослойки эквивалентной толщины H_e (рис. 2.2), которую следует принять равной половине полной высоты профиля поверхности H_{max} [57]:

$$H_e = \frac{H_{max}}{2}. \quad (2.4)$$

Как показали ранее выполненные оценки, весьма удобным инструментом решения уравнения (2.3) является вычислительный блок Given-Pdesolve в среде Mathcad [61, 82]. При использовании этого вычислительного блока после слова Given вводится уравнение (2.3) с применением обозначений принятых в Mathcad. Например, функция $T(x,t)$ в уравнении (2.3) обозначается, как $u(x,t)$. Задаются начальные и краевые условия, которые могут быть заданы 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.

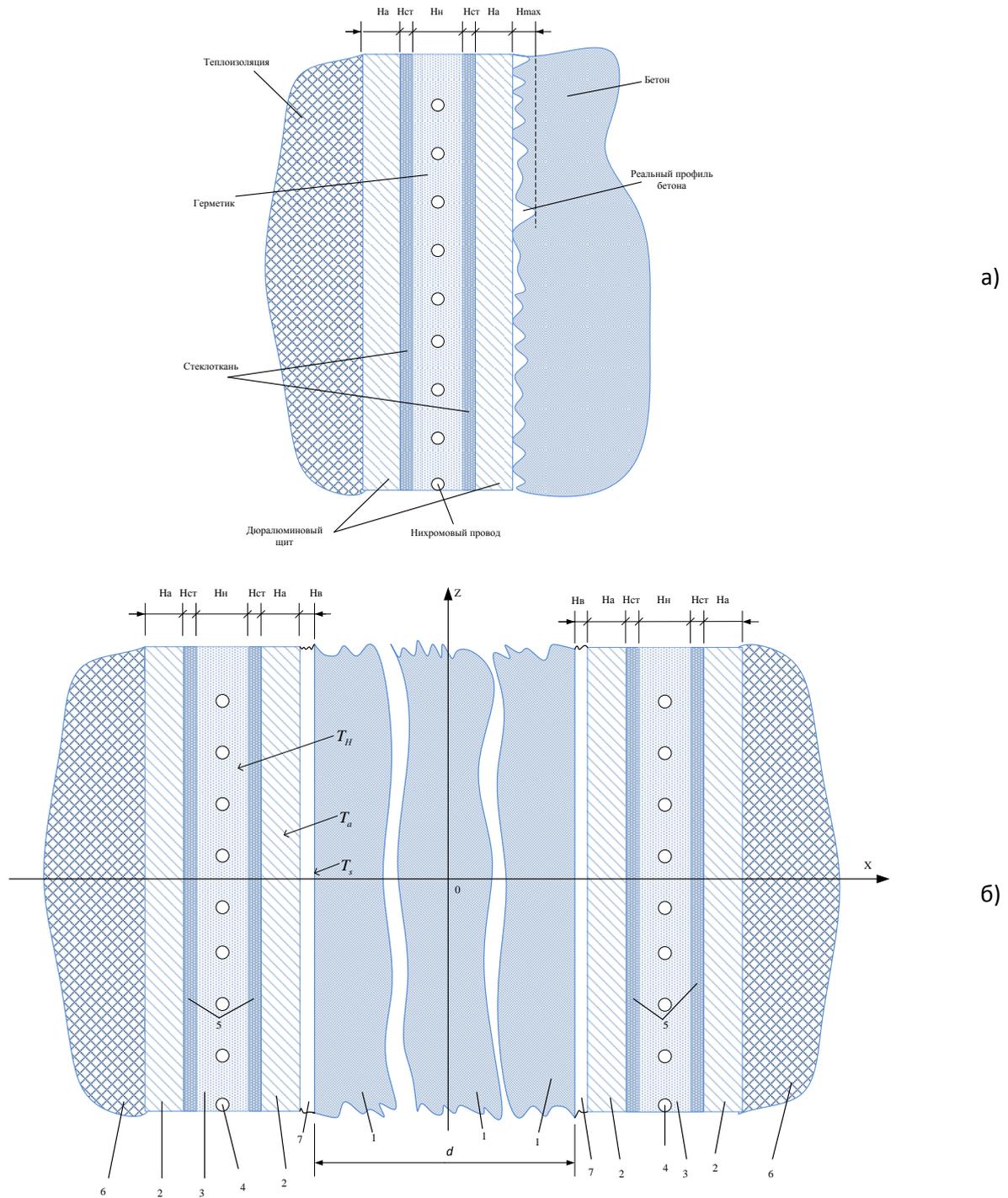


Рис. 2.2. Реальная картина контактирования нагревателя с поверхностью бетона (а) и расчетная схема (б): 1 — железобетонная колонна; 2 — дюралюминиевый щит; 3 — герметик; 4 — нихромовый провод; 5 — стеклоткань; 6 — теплоизоляция; 7 — воздушная прослойка, эквивалентная зазору реального профиля (а); T_s , T_n , T_a — температура поверхности обогреваемого бетона, нагревателя и дюралюминиевого листа; H_b , H_a , $H_{ст}$, H_n — толщина воздушной прослойки, листа дюралюминия, стеклоткани и нихрома с герметиком, соответственно; H_{max} — полная высота профиля поверхности

Затем указывается имя встроенной функции в следующем виде

$$Pdsolve(u,x,xrange,t,trange,[xpts],[tpts]). \quad (2.5)$$

где u – искомая величина, т.е. значение температуры; x – пространственная координата (рис. 2.1); $xrange$ – интервал решения по пространственной координате, который в рассматриваемом случае равен расстоянию вдоль оси x между поверхностью нагревателей (рис. 2.1), т.е. соответствующему размеру сечения железобетонной колонны (обычно на практике – это $xrange=d=40$ 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, т.к. 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 графического 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 [128, 130] применения вычислительного блока Given-Pdesolve, расчеты целесообразно выполнять в несколько этапов, каждый из которых отличается условиями теплового воздействия на объект. В рассматриваемом случае (рис. 1), по-видимому, достаточно выделить два этапа: первый и них соответствует периоду времени изменения температуры нагревателя T_H от начального значения $T_{нач}$ до конечного T_k , второй – период изотермической выдержки, когда температура нагревателя остается неизменной $T_k = T_{изот} = const$. При этом интервалы решения по времени будут иметь для каждого этапа следующие значения

$$\begin{aligned} \text{этап 1: } trange &\geq \Delta t_{нагр} , \\ \text{этап 2: } trange &\geq \Delta t_{изот} . \end{aligned} \tag{2.6}$$

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

Следует отметить, что благодаря применению современных автоматических систем управления нагревателями (рис. 2.1) можно обеспечить практически любой закон изменения (роста) температуры во времени и варьировать $\Delta t_{нагр}$ в широких пределах изменением подаваемой мощности. Однако даже если включить нагреватели сразу же на полную мощность, этот параметр будет иметь хотя и малое, но конечное значение. Вторым показателем имеет на практике, как правило, величину $\Delta t_{изот} \geq 72$ ч. (3 суток).

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 (2.3) на этапе 1 можно записать в следующем виде

$$\begin{aligned} T_1(0,0) = T_1(d,0) = T_1(x,0) = T_{нач} = T_0, \\ T_1(0,t) = T_1(d,t) = T_s = v_s t + T_{нач}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где v_s – скорость нарастания температуры на поверхности бетона при линейном законе ее увеличения, который в наилучшей степени соответствует реальным условиям тепловой обработки (рис. 2.1).

В результате решения уравнения (2.3) с учетом (2.7) определяется распределение (т.е. ее изменение) температуры вдоль оси x для любого момента времени в пределах $0 \leq t \leq \Delta t_{нагр}$. В том числе распределение для момента $t = \Delta t_{нагр}$ окончания стадии нагревания, т.е. вычислений этапа 1:

$$T_1(x, \Delta t_{нагр}) = u(x, \Delta t_{нагр}). \quad (2.8)$$

Эта функция (2.8) является фактически формулировкой начальных условий для вычислений этапа 2

$$T_2(x,0) = T_1(x, \Delta t_{нагр}). \quad (2.9)$$

При этом функция (2.9) должна быть обязательно выражена в аналитической форме. Однако, особенностью вычислительного блока Given-

Решение 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 (2.9) полинома n -ой степени:

$$T_2(x, 0) = T_1(x, \Delta t_{нагр}) = A_n x^n + A_{n-1} x^{n-1} + \dots + A_2 x^2 + A_1 x + A_0, \quad (2.10)$$

где коэффициенты $A_n \div A_0$ – действительные числа.

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

$$T_1(x, \Delta t_{нагр}) = T_1[x_i, \Delta t_{нагр}], \quad (2.11)$$

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 $A_n \div A_0$ для полинома заданной степени n и коэффициента корреляции (r_k^2) исходной функции и ее описания с помощью полинома.

Указанные массивы x_i и $T_1[x_i, \Delta t_{нагр}]$ можно скопировать в другую вычислительную среду (Excel, Matlab) и, используя ее средства, определить искомые величины ($A_n \div A_0, r_k^2$). При этом весьма удобной является среда Excel, т.к. 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 (2.10) температуры вдоль оси x необходимо определить краевые условия, т.е. величину или характер изменения температуры на поверхности объекта (рис. 2.1) аналогично соотношениям (2.7) для этапа 1. Это можно сделать,

полагая, что после завершения стадии нагревания температура нагревателя остается неизменной во времени

$$T_H = T_{изот} = \text{const.} \quad (2.12)$$

Однако из анализа рис. 2.2 нетрудно сделать вывод, что в элементах (слоях) нагревателя будет возникать свое распределение температуры и ее значение на поверхности объекта T_s , определяющая граничные условия при использовании вычислительного блока Given-Pdesolve, будет отличаться от температуры в нагревателе:

$$T_H \geq T_s = T_2(0, t) = T_2(d, t). \quad (2.13)$$

Связь между этими параметрами можно установить из предположения, что температура в слое, где располагается нихромовый провод с электрическим током в толще герметика (H_n – рис. 2.2) и где выделяется тепло, во всех точках имеет одинаковое значение равное T_H . 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 [138, 139]

$$p_s = -\lambda_i \cdot \frac{dT_i}{dx}, \quad (2.14)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности материала соответствующего слоя, $\frac{dT_i}{dx}$ – градиент температуры в этом слое.

Как показано в [130], в результате интегрирования выражения (2.14) с учетом рис. 2.2 получается формула

$$T_s = T_H - p_s \cdot \left(\frac{H_e}{\lambda_e} + \frac{H_a}{\lambda_a} + \frac{H_{cm}}{\lambda_{cm}} \right) \approx T_H - p_s \cdot \left(\frac{H_e}{\lambda_e} + \frac{H_{cm}}{\lambda_{cm}} \right), \quad (2.15)$$

которая устанавливает связь между упомянутыми выше значениями температуры, где λ_e , λ_a , λ_{cm} – коэффициент теплопроводности соответствующих материалов (рис. 2), $\lambda_a \gg \lambda_e$ и λ_{cm} .

Соотношение (2.15) также необходимо использовать и при вычислениях на этапе 1. Однако для использования этой формулы (2.15) требуется знание величины плотности теплового потока p_s , которая может быть определена лишь после решения уравнения (2.3). Причем, к сожалению, вычислительный блок Given-Pdesolve не выдает результата в виде первой производной искомой функции $u(x,t)$ по какому-либо аргументу для того, чтобы можно было воспользоваться формулой (2.14). В таком случае можно прибегнуть к численной оценке:

$$p_s = -\lambda_\sigma \cdot \left(\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right)_{x=0} = -\lambda_\sigma \cdot \text{grad}T(0,t) \approx -\lambda_\sigma \cdot \frac{T(0,t) - T(\delta_x,t)}{\delta_x} = -\lambda_\sigma \cdot \frac{u(0,t) - u(\delta_x,t)}{\delta_x} \quad (2.16)$$

где δ_x – 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_σ – коэффициент теплопроводности бетона; варьированием величины δ можно добиться достаточно высокой точности определения p_s по формуле (2.16), предварительные оценки показали, что на практике целесообразно использовать $\delta_x \leq 0,1$ мм, т.к. 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 (2.10) и (2.13) с учетом (2.12), (2.15) и (2.16). Затем указывается имя встроенной функции (2.5) с учетом (2.6), 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-Pdesolve 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.

Как видно из описания представленной расчетной методики, она позволяет выполнять расчеты распределений температуры вдоль оси x при различной скорости нарастания температуры нагревателя. Вполне очевидно, необходимо знать предельные значения скорости нарастания температуры в нагревателе, исходя из физических параметров элемента. Оценку параметра можно выполнить следующим образом. Поскольку, при включении нагревателя на полную мощность, разогрев будет идти с высокой скоростью, можно предположить, что на стадии нагревания, т.е. при изменении температуры в нагревателе от T_0 до $T_k = T_{изот.}$, можно предположить, что температура поверхности бетона будет оставаться неизменной ($T_s = T_0$). При этом для разогрева нагревателя придется затратить энергию, которую нетрудно оценить по формуле [130, 139]:

$$W_n = C_a \cdot m_a \cdot (T_k - T_0) + C_{cm} \cdot m_{cm} \cdot (T_k - T_0) + C_\Gamma \cdot m_\Gamma \cdot (T_k - T_0) + C_{нх} \cdot m_{нх} \cdot (T_k - T_0) + C_a \cdot m_a \cdot (T_k - T_0) = C_a \cdot m_a \cdot (T_k - T_0) \cdot (C_a \cdot m_a + C_{cm} \cdot m_{cm} + C_\Gamma \cdot m_\Gamma + C_{нх} \cdot m_{нх}), \quad (2.17)$$

где C_a , C_{cm} , C_Γ , $C_{нх}$ – удельная теплоемкость дюралюминия, стеклоткани, герметика, нихрома, соответственно; m_a , m_{cm} , m_Γ , $m_{нх}$ – масса элементов щита опалубки, которая определяется как

$$m = 2S' \cdot H \cdot \delta, \quad (2.18)$$

где S – площадь поверхности; H – толщина, см; δ – плотность материала элементов нагревателя.

Затраты энергии на разогрев, описанные в формулой (2.17), не ограничиваются ей. Действительно, в процессе разогрева составных частей электронагревателей одновременно будет возникать теплоперенос от них в сторону бетона, т.к. температура на поверхности обогреваемого объекта будет ниже температуры самого обогревателя. На всем пути теплового потока и в поверхностном слое обрабатываемого изделия вдоль оси x справедливо соотношение [130, 138, 139]

$$p_s = -\lambda_i \cdot \frac{dT_i}{dx}. \quad (2.19)$$

Значение плотности теплового потока нетрудно определить с помощью соотношения (2.15), выразив из нее плотность теплового потока и учитывая, что:

$$P_s = \frac{(T_n - T_s)}{\left(\frac{H_{\epsilon}}{\lambda_{\epsilon}} + \frac{H_{cm}}{\lambda_{cm}}\right)}. \quad (2.20)$$

Полученное соотношение (2.20) позволяет определить значение энергии, израсходованной на теплоперенос от нагревателя в направлении поверхности бетона за время стадии нагревания ($\Delta t_{нагр}$), учитывая, что $T_n = T_0$, с помощью следующего соотношения [130, 139]:

$$W_n = \int_{T_0}^{T_k} \frac{(T_n - T_s)}{\left(\frac{H_{\epsilon}}{\lambda_{\epsilon}} + \frac{H_{cm}}{\lambda_{cm}}\right)} dT_n = \frac{(T_k - T_0)^2}{2 \cdot \left(\frac{H_{\epsilon}}{\lambda_{\epsilon}} + \frac{H_{cm}}{\lambda_{cm}}\right)}. \quad (2.21)$$

После этого нетрудно определить полные затраты энергии на стадии нагревания:

$$W = W_n + W_{н}. \quad (2.22)$$

С другой стороны, данная энергия должна быть равна энергии, переданной нагревателю от источника питания за время стадии нагрева, который нетрудно оценить с помощью формулы

$$W_{\epsilon} = P_{ном} \cdot \Delta t_{нагр} = W. \quad (2.23)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность нагревателя

Отсюда нетрудно определить длительность стадии нагревания:

$$\Delta t_{нагр} = \frac{W_n + W_{н}}{P_{ном}}. \quad (2.24)$$

Значения этого параметра, полученные с помощью формулы (2.24) можно использовать при вычислениях с помощью приведенной выше методики расчета характеристик нестационарного температурного поля при электротепловой обработке штепсельного соединения.

2.2.2 Методика расчета характеристик температурного поля вдоль оси железобетонных колонн при электротепловой обработке штепсельного соединения.

Вполне очевидно, что в ходе электротепловой обработки после полного прогрева материала в области штепсельного стыка возникает стационарный температурный режим, при котором температура в направлении оси x (рис. 2.1, 2.2) приобретает одинаковые значения, т.е. градиенты температуры в этом направлении практически отсутствуют. Однако в таком случае будет иметь место наиболее неравномерное распределение температуры, т.е. наличие максимальных градиентов температуры, вдоль оси колонны, которое существует на протяжении всего времени ЭТО (обычно 72 ч.). Поэтому актуальной является задача оценки опасности воздействия таких градиентов на материал железобетонных колонн.

Схема, представленная на рис. 2.3, иллюстрирует процедуру расчетного определения характеристик температурного поля вдоль оси железобетонной колонны (оси z). Эта схема представляет собой фактически увеличенный в вертикальном направлении вариант схемы рис. 2.1.

Выполнить расчетную оценку характеристик стационарного температурного поля в этом случае (рис. 2.3) возможно на основе анализа физической картины распространения тепловых потоков. Действительно, источником тепла являются нагреватели, установленные на противоположные поверхности соединяемых железобетонных колонн в области их штепсельного соединения (рис. 2.3). От них вглубь материала распространяются тепловые потоки плотностью q_n , встретившись, они имеют два направления дальнейшего распространения: либо параллельно оси y в обоих направлениях q_y (рис. 2.3 – система координат расположена в центре штепсельного соединения), либо параллельно оси z также в обоих направлениях q_z (рис. 2.3).

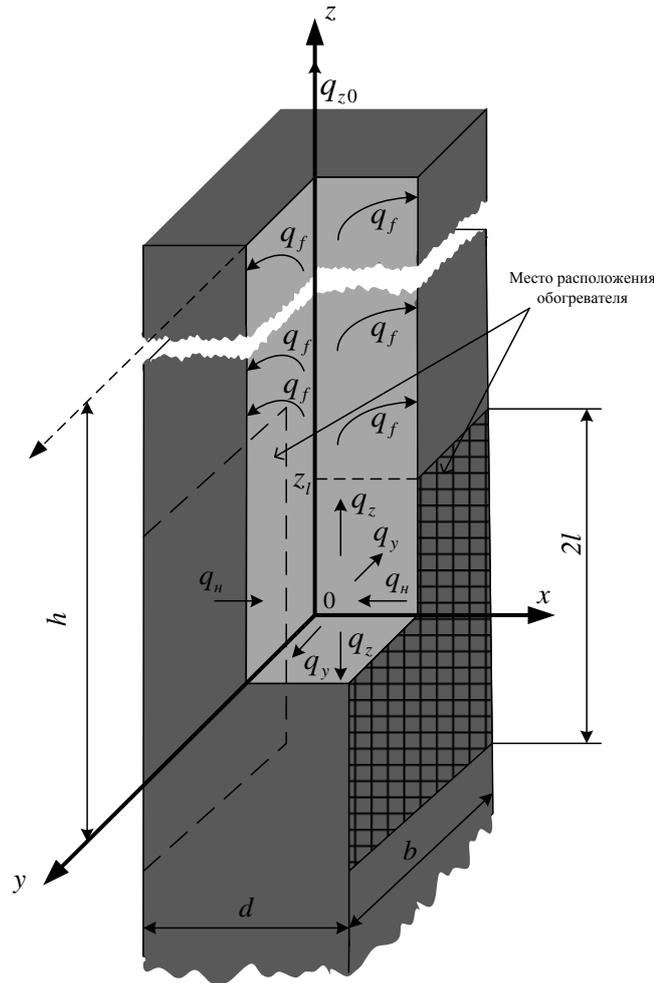


Рис. 2.3. Расчетная схема для определения характеристик стационарного температурного поля вдоль оси железобетонной колонны в ходе ЭТО штепсельного соединения с помощью поверхностного электропрогрева, где h – высота колонны; d , b – размеры поперечного сечения колонны в различных направлениях; l – половина высоты обогревающего щита (поверхностного электронагревателя); q – плотность теплового потока.

Однако на пути тепловых потоков плотностью q_y существует, как отмечалось выше (разд. 2.2.1), препятствие в виде слоя теплоизоляции, которая укладывается на все боковые поверхности железобетонных колонн в области штепсельного соединения в целях снижения потерь энергии в ходе ЭТО и получения, по возможности, однородного температурного поля в этой области. Предварительные оценки на основе ранее выполненных исследований [130, 138, 139] показали, что при выполнении инженерных расчетов тепловым потоком q_y можно пренебречь, т.к. тепловые потоки q_z

имеют почти на два порядка большую плотность, т.е. $q_y \ll q_z$. Тепловые потоки q_z , покинув область штепсельного соединения, направляются к открытой поверхности железобетонных колонн и рассеиваются в окружающую среду, а по мере удаления от места тепловой обработки их плотность q_f (рис. 2.3) постепенно снижается. Исключением является тепловой поток, который распространяется строго вдоль оси z и плотность которого в случае стационарного температурного поля остается неизменной на всем пути вдоль колонны ($0 \leq z \leq h$ – рис. 2.3):

$$q_{z0} = const. \quad (2.25)$$

Это обусловлено тем, что согласно симметрии температурного поля в рассматриваемом объекте относительно оси z (рис. 2.3) в ее любой точке справедливы следующие соотношения [130,139]

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad (2.26)$$

т.е. строго на оси тепловой поток в поперечном к ней направлении отсутствует (λ – коэффициент теплопроводности материала).

Другой важной особенностью рассматриваемого случая (рис. 2.3) является то, что в области штепсельного соединения температурное поле следует считать близким к однородному, т.е. имеющему практически одинаковую температуру по всему объему этой области. Следует сделать предположение, что такую ситуацию можно рассматривать эквивалентной случаю, когда в этой области имеет место равномерное выделение тепла по всему объему, а мощность объемного источника тепла можно оценить следующим образом:

$$q_v = \frac{2p_n}{V_{uu}} = \frac{p_n}{l \cdot d \cdot b} = const, \quad (2.27)$$

где P_n – электрическая мощность, передаваемая в каждый из нагревателей для поддержания тепловых потоков q_n (рис. 2.3) на стадии изотермической выдержки; $V_{ин} = 2 \cdot l \cdot d \cdot b$ – объем прогреваемой области (рис. 2.3).

Как выше отмечено (разд. 2.1.2), основным способом определения характеристик температурного поля в объеме материала является решение дифференциального уравнения тепломассопереноса посредством теплопроводности (2.1) в трехмерном пространстве, которое с учетом наличия объемного тепловыделения будет иметь вид [130, 138, 139]

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T(x, y, z, t) + \frac{q_v}{c\rho}. \quad (2.28)$$

В общем случае решение уравнения (4) осуществляется, как уже было сказано, применением численных методов, требующих от специалиста соответствующих знаний, специальной подготовки и большого объема работы по программированию и отладке вычислений [61, 82], т.е. представляет собой весьма сложную задачу.

Однако в рассматриваемом случае ее решение можно существенно упростить: во-первых, температурное поле в области штепсельного соединения после разогрева до температуры изотермической выдержки можно считать стационарным, и левая часть уравнения (4) приобретает значение

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = 0, \quad (2.29)$$

во-вторых, следует предположить, что для изучения характеристик температурного поля по длине железобетонной колонны достаточно найти решения в виде изменения температуры и градиентов температуры вдоль оси z . В этом случае уравнение (2.28) приобретает вид

$$\lambda \frac{\partial^2 T_1(z)}{\partial z^2} + q_v = 0. \quad (2.30)$$

Анализ расчетной схемы позволяет сделать вывод, что выражение (2.30) будет справедливо только для области штепсельного соединения ($-z_l \leq z \leq z_l$ – рис. 2.3, где $z_l = l$).

За пределами этой области следует считать, что источник тепла в объеме материала отсутствует $q_v = 0$, а, как показали ранее выполненные оценки [130, 138], из-за больших размеров (длины) железобетонной колонны температурное поле вдоль ее оси уже не может рассматриваться как стационарное, тогда уравнение (4) приобретает вид

$$\frac{\partial T_2(z, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_2(z)}{\partial z^2}. \quad (2.31)$$

Это означает, что расчет температурных характеристик должен состоять из двух этапов: на первом из них расчет $T_1(z)$ производится на основе решения уравнения (2.30), а на втором ($T_2(z)$) – посредством решения уравнения (2.31) с учетом индивидуальных для каждого этапа граничных условий.

После первого интегрирования выражения (2.31) получается формула, позволяющая рассчитать изменение градиента температуры вдоль оси z [139]:

$$\text{grad}T_1(z) = \frac{\partial T_1(z)}{\partial z} = -\frac{q_v}{\lambda} z + C_1, \quad (2.32)$$

а после второго интегрирования получается выражение для расчета изменения температуры вдоль оси z [4]:

$$T_1(z) = -\frac{q_v}{2\lambda} z^2 + zC_1 + C_2, \quad (2.33)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, определяемые исходя из граничных условий, которые с учетом симметрии температурного поля вдоль оси z относительно начала координат (рис. 2.3) можно описать следующими соотношениями

$$\text{grad}T_1(z=0) = \frac{\partial T_1(z=0)}{\partial z} = 0, \quad T_1(z=0) = T_0 = T_{\text{изот}}, \quad (2.34)$$

где $T_0 = T_{изот}$ – температура в начале системы координат (рис. 1), принята равной температуре изотермической стадии ЭТО.

На основании (2.32), (2.33) и (2.34) постоянные интегрирования имеют величину

$$C_1 = 0, C_2 = T_{изот}, \quad (2.35)$$

а формулы (2.33) и (2.34) с учетом (2.27) приобретают вид

$$\begin{aligned} gradT_1(z) &= \frac{\partial T_1(z)}{\partial z} = -\frac{q_V}{\lambda} z = -\frac{P_H}{\lambda \cdot l \cdot d \cdot b} z, \\ T_1(z) &= T_{изот} - \frac{q_V}{2\lambda} z^2 = T_{изот} - \frac{P_H}{2 \cdot \lambda \cdot l \cdot d \cdot b} z^2. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Выражения (2.36) представляют собой окончательный результат решения уравнения (2.30) и справедливы при изменении координаты z от 0 до $z = \pm z_l = l$ (рис. 2.30).

Определение характеристик нестационарного температурного поля в рассматриваемой конструкции (рис. 2.30) на участке от $z = l$ до $z = h$ сводится к решению одномерного уравнения теплопереноса (2.31). Весьма удобным инструментом решения этого уравнения (2.31) является снова использование вычислительного блок Given-Pdesolve в среде Mathcad [61, 82]. В этом случае записывается слово Given, а затем уравнение (2.31) с применением обозначений принятых в Mathcad. Например, функция $T(z, t)$ в уравнении (2.31) обозначается, как $u(x, t)$ и задаются начальные и краевые условия, которые в рассматриваемом случае (рис. 2.3) описываются, с учетом (2.36), следующими соотношениями

$$\begin{aligned} gradT_1(z=l) &= gradT_2(z=l) = -\frac{P_H}{\lambda \cdot l \cdot d \cdot b} l, \\ T_1(z=l) &= T_2(z=l) = T_{изот} - \frac{P_H}{2 \cdot \lambda \cdot l \cdot d \cdot b} l^2, \quad T_2(z=h) = T_0, \end{aligned} \quad (2.37)$$

где T_0 – температура окружающей среды, т.е. предполагается, что точка на поверхности торца колонны ($z = h$) имеет температуру окружающей среды; в среде Mathcad эти условия выглядят следующим образом: $u(x, 0) = T_0$ – температура в начальный момент времени вдоль оси z (имеет одинаковое

значение во всех точках и равна температуре окружающей среды); $u(L,t)=T_0$, где $L=h-l$, – температура в любой момент времени в точке $z = h$ на верхней торцевой поверхности колонны (рис. 2.3) и $u(0,t)=T_Z$, где T_Z – параметр, который варьируется до получения равенства $T_Z = T_1(z=l) = T_2(z=l)$ с учетом (2.37), т.е. расчет выполняется посредством итерационных вычислений.

Затем, по аналогии с (2.5), указывается имя встроенной функции в следующем виде

$$\text{Pdsolve}(u,x,xrange,t,trange,[xpts],[tpts]). \quad (2.38)$$

где u – искомая величина, т.е. значение температуры; x – пространственная координата (рис. 2.3); $xrange$ – интервал решения по пространственной координате, который в рассматриваемом случае равен расстоянию вдоль оси колонны от $z = l$ до $z = h$, т.е. $xrange=L=h-l$ (рис. 2.3); t – координата по времени; $trange$ – интервал решения по времени, т.е. длительность ЭТО; $xpts$ и $tpts$ – количество точек дискретизации по пространственной координате и по времени, их задавать необязательно (вычислительный блок сам выбирает оптимальные значения этих параметров).

Как отмечалось выше (разд. 2.2.1), вычислительный блок Given-Pdsolve не выдает результата в виде первой производной искомой функции $u(x,t)$ по какому-либо аргументу для того, чтобы можно было воспользоваться формулой [130, 138]

$$q_{z0}(z,t) = -\lambda \text{grad}T(z,t) = -\lambda \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \quad (2.39)$$

для определения плотности теплового потока в любой точке и в любой момент времени на оси z .

В таком случае можно прибегнуть к численной оценке:

$$q_{z0}(z,t) = -\lambda \text{grad}T(z,t) = -\lambda \frac{T(z,t) - T(z + \delta_z, t)}{\delta_z} = -\lambda \frac{u(x,t) - u(x + \delta_z, t)}{\delta_z}, \quad (2.40)$$

где δ_z – малый участок на оси z в рассматриваемой точке, в пределах которого градиент температуры можно принять постоянным; варьированием величины δ_z можно добиться достаточно высокой точности определения

$q_{z_0}(z, t)$ по формуле (2.40), предварительные оценки показали, что на практике целесообразно использовать $\delta_z \leq 0,1$ мм, т.к. погрешность вычислений составляет не более 0,0001%, что согласуется с аналогичным результатов, полученным выше (разд. 2.2.1).

Формула (2.40) позволяет определять значение p_n для расчетов по формулам (2.37). Действительно, при достижении стационарного температурного режима в области штепсельного соединения ($z = \pm l$ – рис. 2.3) в ходе ЭТО плотность теплового потока на выходе из этой области ($z = \pm l$) в направлении оси z на основании (2.40) определяется выражением

$$q_{z=l} = q_{z_0}(z = l, t) = -\lambda \frac{T(l, t) - T(l + \delta_z, t)}{\delta_z} = -\lambda \frac{u(0, t) - u(\delta_z, t)}{\delta_z}. \quad (2.41)$$

Этот тепловой поток, как выше показано, рассеивается в окружающую среду (q_f – рис. 2.3), и, исходя из того, что в стационарном режиме существует баланс мощностей $p_n = p_{\text{расc}}$, можно записать

$$p_n = p_{\text{расc}} = F q_{z=l} = -\lambda F \frac{T(l, t) - T(l + \delta_z, t)}{\delta_z} = -\lambda F \frac{u(0, t) - u(\delta_z, t)}{\delta_z}, \quad (2.42)$$

где $F = d \cdot b$ – площадь поперечного сечения колонны

2.3. Разработка требований, предъявляемых к материалу для заполнения штепсельных соединений, обоснование его вида и предполагаемого состава.

Для стыковых соединений в массовом сборном и сборно-монолитном строительстве применяются мелкозернистые смеси на основе расширяющихся цементов (напрягающего, гипсоглиноземистого, расширяющегося портландцемента, цемента с компенсированной усадкой), которые устраняют и ослабляют главный недостаток бетонов на основе рядового портландцемента – усадочные деформации [141]. Однако, эффект расширения, при всех достоинствах названных цементов, реализуется в них

лишь при поступлении в твердеющий состав влаги извне. А это зачастую трудно обеспечить в реальных условиях. В частности, это проблематично для указанного выше бесварного стыка с частично или полностью закрытым объемом. Подтверждением этому являются исследования Михайлова, Кравченко, Тейлора, Ларионовой, Рояка и др., которыми установлено, что твердение расширяющихся цементов в воде сопровождается интенсивным расширением, в нормально-влажностных условиях – незначительным расширением, а в воздушно-сухих условиях сопровождается даже усадкой. [78, 79, 141].

Поэтому, весьма актуальным является поиск способов интенсификации собственных деформаций расширения омоноличивающих композиций, изготовленных на рядовых портландцементях. При этом остаются постоянными задачи улучшения их технологических свойств, повышения прочности и долговечности. Решение этих задач, по-видимому, возможно путем модификации портландцемента комплексными полифункциональными добавками, способными направленно регулировать физико-химические процессы гидратации компонентов вяжущего и структурообразования цементного камня [3, 4, 6, 12, 14, 16, 24].

Отдельное внимание следует уделить текучести состава. Как известно, штепсельные стыки колонн выполняются в различных конструктивных сочетаниях, в частности для однотипности стыка штепсельную арматуру располагают в нижней и верхней части стыкуемых колонн [55, 103, 112]. Расстояние между арматурой и штепсельным отверстием (скважиной) может составлять менее 10 мм, чтобы обеспечить качественное заполнение. В случаях с обратными стыками, его заполнение происходит через канальное заливное отверстие диаметром до 20 мм. При отсутствии компрессионного сжатия и дополнительного усилия при подаче смеси в скважину, возможно появление незаполненных участков штепсельного отверстия, что может привести конструкцию в непригодное состояние. Поэтому актуальным является вопрос о разработке текучих смесей для замоноличивания стыков

сборных железобетонных конструкций и ремонтных работ, в том числе преднапряженных: балок, опор, мостовых плит, густоармированных поверхностей и, в частности, для труднодоступных участков конструкций, где по технологии требуется повышенная текучесть на стадии применения и высокая ранняя прочность.

Известные сухие смеси, включающие портландцемент, песок, минеральную расширяющую добавку, ускоритель твердения в большинстве не имеют высокой пластичности [94]. Для повышения их текучести необходимо увеличить водотвердое отношение, что снижает характеристики ранней прочности материала при сжатии и изгибе.

Сухие строительные смеси для ремонтно-восстановительных работ обычно включают щебень фракции 3-10 мм, песок $M_{кр}=2,0-4,0$, минеральное вяжущее – портландцемент марки не менее 500, суперпластификатор С-3, сверхбыстротвердеющий цемент на основе сульфоалюмината кальция, стальную фибру и т.д. Прочностные характеристики таких смесей достаточно высоки, однако способность проникать в труднодоступные участки конструкций через отверстия диаметром 10-15 мм у них затруднена.

Важной задачей является создание строительной мелкозернистой бетонной смеси способной к самоуплотнению, обеспечивающей класс бетона не менее В30 на 3 суток твердения, которая может быть использована для ускоренного возведения монолитных конструкций и аварийного ремонта труднодоступных участков конструкций, например, в качестве раствора для заполнения штепсельных соединений колонн, замоноличивания предельно узких стыковых зон сборно-монолитных железобетонных каркасных конструкций, для заливки пустот в теле бетонных и железобетонных конструкций. Данная смесь должна подаваться к месту замоноличивания методом инъецирования через предельно малые отверстия диаметром до 4-10 мм. Это требование во многом во многом определяется сохранением текучести смеси при использовании бетонных смесей в условиях пониженных температур. Как указывают авторы [6, 148, 149, 150, 151, 152,

156], пластифицированные бетонные смеси с низким водоцементным отношением на основе нафталино-формальдегидных компонентов, могут иметь повышенную вязкость при низких температурах. Текучесть пластификаторов во многом зависит от принципа их действия. Для сохранения подвижности, как правило, рекомендуются суперпластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров. Данный пластификатор адсорбируется на поверхностях цемента и минеральных частиц [2, 5, 10, 11, 13, 18, 19, 28, 29, 30, 121, 143, 153, 154]. Как и все распространенные типы, суперпластификатор обеспечивает отрицательный заряд, который адсорбирует положительно заряженные частицы компонентов смеси или дает направления положительно заряженного дзета-потенциала. По словам авторов [151, 152, 153, 154] адсорбция суперпластификатора в основном происходит на поверхности C_3A и C_4AF изначально, а также на моносульфатах и этtringите. Если в случае самоуплотняющихся смесей добавляются высокие количества поликарбоксилатов, то часть из них адсорбируются не сразу, а со сдвигом во времени при образовании этtringита. Это означает, что этtringит снижает удобоукладываемость цементных паст без пластификаторов и практически обеспечивает текучесть в системе, включающей достаточное количество модификатора.

Мелкозернистые самоуплотняющиеся смеси, имеющие повышенную текучесть, представлены в широком спектре продукции ремонтных составов. В частности, имеются составы наливного типа, имеющие реопластичную литую консистенцию [64, 65]. Опыт применения такого типа бетона показал, что несмотря на быстрый набор прочности отсутствия усадочных деформаций и высоких подателей текучести, возможность их использования в качестве смеси для инъектирования ограничена из-за размера заполнителя, размер фракции которой может составлять до 5 мм, тем самым делая невозможным укладку ремонтной смеси в предельно узкие отверстия.

2.4. Выводы по главе 2

Сведения, представленные в настоящей главе, позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Одним из наиболее ответственных элементов монтажных работ в сборно-монолитном строительстве является процесс получения надежных штепсельных соединений железобетонных колонн, который включает в себя несколько взаимосвязанных составных частей (этапов), из которых наиболее сложным и опасным, при определенных условиях, является процесс электротепловой обработки (ЭТО) штепсельного соединения; в свою очередь, квалифицированное решение вопросов разработки таких процессов в целях получения качественного штепсельного соединения требует всестороннего исследования характеристик нестационарного температурного поля в ходе ЭТО.
2. Предложенная методика расчета характеристик температурных полей в объеме материала в поперечном сечении 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, т.к. использует вычислительные возможности широко распространенной среды Math Cad.
3. Не менее доступной для практического использования является также методика расчета характеристик температурного поля в продольном сечении железобетонных колонн, рассмотренная в настоящей главе, которая вместе с методикой, указанной в предыдущем пункте, образует необходимый набор инструментов для полноценного исследования характеристик температурных полей при разработке процессов ЭТО штепсельных соединений железобетонных колонн.

4. Необходимо, используя эти методики, тщательно и всесторонне исследовать характеристики температурных полей процесса электротепловой обработки применительно к реальным условиям в целях выявления особенностей и основных закономерностей такого процесса.

ГЛАВА 3. Теоретическое исследование температурных полей в объеме материала железобетонных колонн при электротепловой обработке их штепсельного соединения с помощью поверхностного электрообогрева

Как показано в гл. 2, предложенные в настоящем диссертационном исследовании методики расчета характеристик нестационарных температурных полей в объеме материала железобетонных колонн в ходе электротепловой обработки их штепсельных соединений (разд. 2.2) является важнейшим и неотъемлемым инструментом разработки технологического процесса получения штепсельных соединений при выполнении монтажных работ сборно-монолитного строительства. Они позволяют всесторонне исследовать характеристики таких температурных полей, и на основе результатов таких исследований разрабатывать рациональные режимы процессов электротепловой обработки штепсельных соединений, обеспечивающие высокую надежность этих узлов.

3.1. Характеристики нестационарного температурного поля в поперечном сечении штепсельного соединения на стадии нагревания

Как свидетельствуют ранее выполненные исследования [127, 130], на стадии нагревания процесса электротепловой обработки наиболее часто возникают различные особенности, опасности и риски для изделий и материалов, подвергающихся такой обработке, о которых было сказано в гл. 1 и гл. 2. Поэтому исследование характеристик температурных полей для этой стадии представляет собой первоочередную задачу.

Для решения этой задачи целесообразно использовать расчетную методику, изложенную в разд. 2.2.1. С помощью этой методики были

выполнены расчеты распределения температуры вдоль оси x в конструкции рис. 2.1 при условиях

$$\begin{aligned} \text{этап 1: } T_H &= v_H t + T_{нач} \text{ при } 0 \leq x \leq \Delta t_{нагр}, \\ \text{этап 2: } T_H &= T_{изот} = \text{const при } \Delta t_{нагр} \leq x \leq \Delta t_{изот} \end{aligned} \quad (3.1)$$

при различных значениях скорости подъема температуры в нагревателе v_H на стадии нагревания для железобетонной колонн сечением 400x400 мм, которые получили наибольшее применение в сборно-монолитном строительстве [66, 77, 48, 103, 110].

На рис. 3.1 представлены в результаты этих расчетов в виде кривых распределения температуры (т.е. ее изменения) вдоль оси x в различные моменты времени.

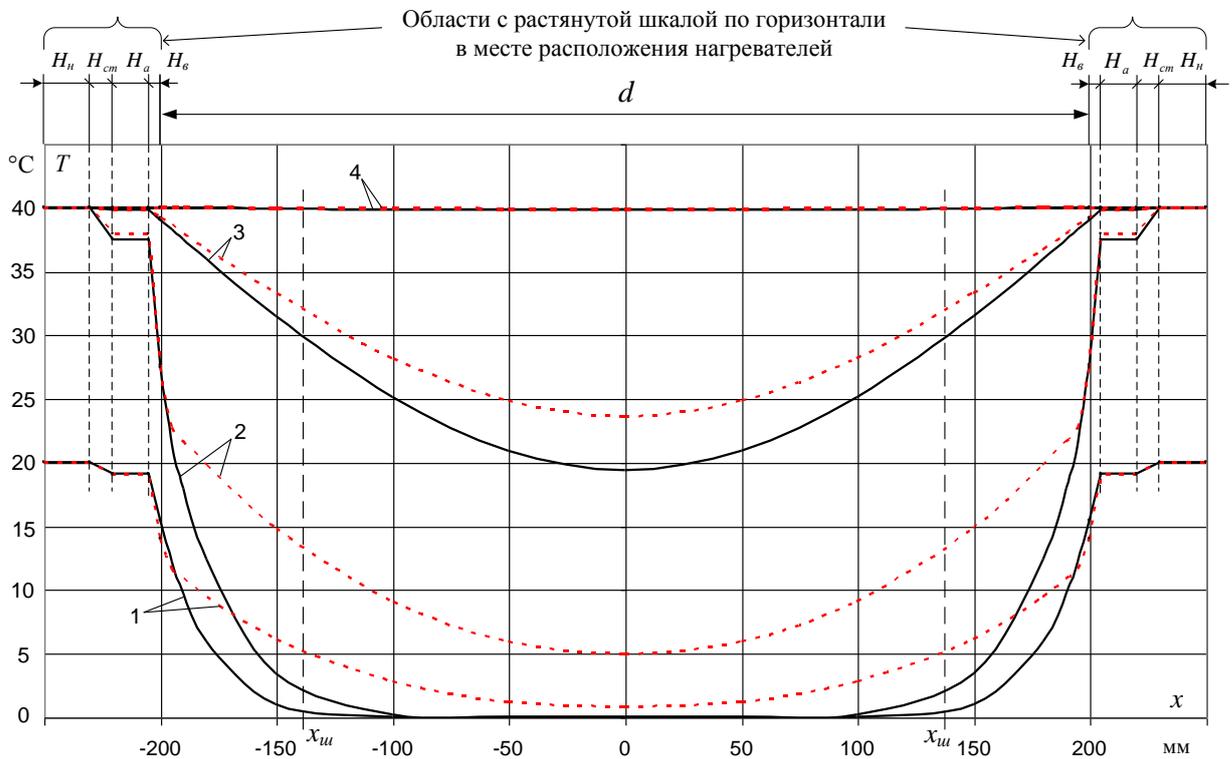


Рис. 3.1 Изменение (распределение) температуры вдоль оси x в различные моменты времени t поверхностного электропрогрева (рис. 2.1) при скорости подъема температуры в нагревателе $v_H = 110$ °C/ч. (сплошные линии) и $v_H = 10$ °C/ч. (пунктирные линии): 1 – $t = \Delta t_{нагр}/2$; 2 – $t = \Delta t_{нагр}$; 3 – $t = \Delta t_{нагр} + 4$ ч.; 4 – $t = \Delta t_{нагр} + 24$ ч.; $T_0 = 0$ °C; $T_{изот} = 40$ °C; $x_{ш}$ – координата оси штепсельного стыка; $H_e = 0,05$ мм

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 . Значение толщины воздушной прослойки согласно (2.4) на основании сведений [57] в расчетах принято равным $H_g = 0,05$ мм.

Из рис. 3.1 нетрудно сделать вывод, что в процессе прогрева бетона температура на его поверхности T_s существенно отличается от температуры нагревателя T_n : увеличение T_s существенно отстает от роста T_n . При этом максимальная разность величиной около 13 °С (примерно 30 % от $T_{изот} = 40$ °С) между этими величинами достигает в момент окончания стадии нагревания (кривые 2 – рис. 3.1). Характерно, что причина такого явления – это наличие тонкой воздушной прослойки H_g (рис. 2.1).

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 ($x_{ш}$) с ≈ 2 °С до ≈ 13 °С (сплошные и пунктирные линии 2). Тем не менее, этот показатель далек от конечного значения 40 °С по завершении прогрева, который наблюдается после истечения 24 ч. с момента окончания стадии нагревания (кривые 4).

Используя результаты вычислений с помощью предложенной методики, например, в виде, представленном на рис. 3.1, можно решать различные задачи: получать зависимости температуры и градиента температуры от времени в различных точках конструкции (рис. 2.1), изучать влияние разных факторов на процесс электротепловой обработки штепсельного соединения и др. в целях оптимизации технологического процесса и оборудования.

Как видно из зависимостей рис. 3.1, предложенная методика позволяет выполнять расчеты распределений температуры вдоль оси x при различной

скорости нарастания температуры нагревателя, т.е. различной длительности стадии нагревания $\Delta t_{нагр}$. Вполне очевидно, необходимо знать предельные значения этих показателей, исходя из физических параметров нагревателя, т.к. они определяют граничные условия решения уравнения (2.1). Соотношения (2.20)÷(2.24) (разд. 2.2.1) позволяют выполнить такие расчетные оценки, а результаты выполненных вычислений представлены на рис. 3.2. При этом были приняты следующие значения теплофизических параметров: $C_a = 920 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$; $C_{ст}=840 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$; $C_{Г}= 2,07 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град}$; $C_{нх}=450 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$; $\delta_a = 2,75 \text{ г/см}^3$; $\delta_{ст} = 0,02 \text{ г/см}^2$ (поверхностная плотность); $\delta_z = 1,05 \text{ г/см}^3$; $\delta_{нх} = 8,35 \text{ г/см}^3$; $m_a = 1,232 \text{ кг}$; $m_{ст} = 0,064 \text{ кг}$; $m_{Г} = 0,252 \text{ кг}$; $m_{нх} = 0,078 \text{ кг}$, которые соответствуют конструкции поверхностного нагревателя, использованного в экспериментах, как показано далее (гл. 4), а также нагревателям, рекомендованным к применению на практике.

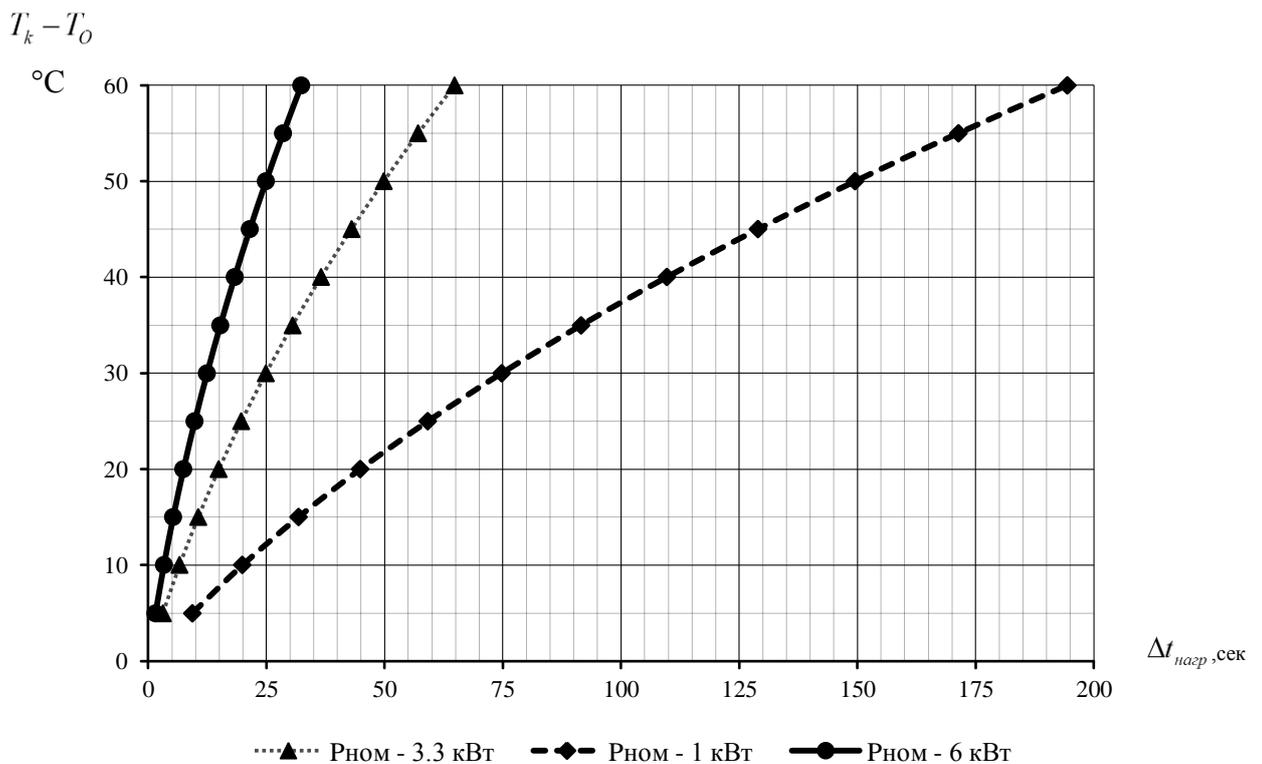


Рис. 3.2. Зависимость разности температуры $T_k - T_0$ от длительности разогрева $\Delta t_{нагр}$ при различной номинальной мощности нагревателя

На основании рис. 3.2 можно сделать вывод, что процесс разогрева поверхности нагревателя при его включении на полную мощность происходит с высокой скоростью: например, даже при наиболее тяжелых температурных условиях ($T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$) время достижения требуемого значения $T_k = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет около 2 мин при $P_{ном} = 1 \text{ кВт}$, не более 45 с при $P_{ном} = 3,3 \text{ кВт}$ и около 20 с при $P_{ном} = 6 \text{ кВт}$. Такие показатели роста температуры существенно превышают предельно допустимое значение ($10 \text{ }^\circ\text{C/ч.}$), принятые в настоящее время для тепловой обработки железобетонных изделий [97, 104, 105]. Анализ зависимостей рис. 3.2 позволяет сделать вывод, что максимальная скорость подъема температуры в нагревателе при включении его на полную мощность может достигать $v_H = 5000 \div 6000 \text{ }^\circ\text{C/ч.}$ Это означает, что источники питания, применяемые для электроснабжения нагревателей поверхностного электропрогрева, должны быть снабжены устройствами автоматического управления для обеспечения требуемого графика тепловой обработки.

3.2. Исследование временных характеристик температурного поля в поперечном сечении штепсельного соединения в ходе ЭТО.

На рис. 3.3 представлены расчетные зависимости температуры в нагревателе и на оси штепсельного стыка (рис. 2.1, рис. 3.1 – $x_{ш}$) от времени тепловой обработки штепсельного соединения железобетонных колонн сечением $400 \times 400 \text{ мм}$ с помощью поверхностного электропрогрева при различной скорости нарастания температуры в нагревателях: $v_H = 6,25 \text{ }^\circ\text{C/ч.}$, что соответствует рекомендациям, полученным выше (разд. 3.1) и $v_H = 5500 \text{ }^\circ\text{C/ч.}$, что соответствует ситуации включения нагревателя на полную мощность (рис. 3.2). Характерной особенностью температурных зависимостей, представленных на рис. 3.3, является то, что изменение

температуры показано не в пространстве, как это было сделано в [127], т.е. вдоль оси x (рис. 1), а во времени. Такое представление результатов расчета и эксперимента является в некоторых случаях более наглядным и информативным для решения практических вопросов применения электротепловой обработки железобетонных изделий.

Расчеты выполнены для начальной температуры $T_0 = 0$ °С (минимально допустимое значение температуры окружающего воздуха для проведения монтажных работ при сборно-монолитном строительстве) и $T_{изот} = 50$ °С. Важной особенностью применения расчетной методики (разд. 2.2.1) при получении расчетных зависимостей рис. 3.3 является то, что при вычислениях толщина воздушной прослойки между поверхностью электронагревателя и бетона была принята равной $H_e = 0,45$ мм (см. рис. 2.2). Это значение было получено по результатам измерения фактического зазора между поверхностью электронагревателя и бетоном с помощью набора щупов в реальной конструкции [57], как будет показано далее (гл. 4).

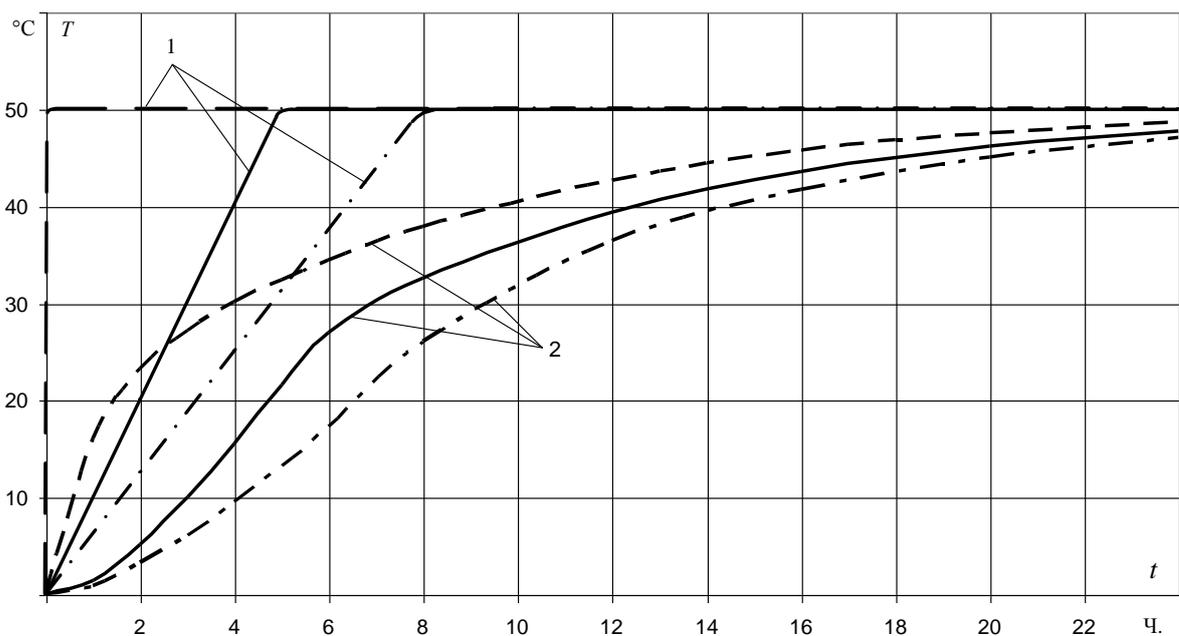


Рис. 3.3. Зависимости температуры (а) и градиентов температуры (б) от времени ЭТО при различной скорости роста температуры в нагревателе v_H : 1 – температура в нагревателе; 2 – температура на оси стыка $x_{ш} = \pm 147,5$ мм; пунктирные линия – $v_H = 5500$ °С/ч.; сплошные – $v_H = 10$ °С/ч.; штрих-пунктирные – $v_H = 6,25$ °С/ч.

На основании этих зависимостей (рис. 3.3) можно сделать вывод, что скорость подъема температуры на стадии нагревания v_H оказывает заметное влияние на характер повышения температуры в месте расположения стыка (рис. 2.1), заполненного свежей бетонной смесью, в пределах первых 12÷14 часов. В последующее время отличие характеристик быстро уменьшается и к истечению первых суток становится несущественным. Учитывая, что общее время 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.

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 $gradT$ [130, 138, 139]. Он определяет величину внутренних механических напряжений в материале и возможность необратимого и недопустимого его механического повреждения в ходе электротепловой обработки [130, 138, 139]. Надо сказать, что опытное определение величины этого параметра представляет собой сложную задачу. Однако предложенная методика расчета характеристик температурного поля, как показано в разд. 2.2.1, позволяет определять величину этого параметра в любой точке материала. Поэтому одновременно с получением расчетных зависимостей рис. 3.3 была получена расчетные кривые изменения во времени градиента температуры $gradT$ 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, а расчетные зависимости представлены на рис. 3.4.

Полученные кривые (рис. 3.4) демонстрируют, что для градиентов температуры наблюдается совершенно иная картина, чем в случае температурных зависимостей (рис. 3.3). Зависимости градиентов

температуры (рис. 3.3) иллюстрируют весьма существенное влияние скорости нагрева (v_H) на величину $gradT$.

Как показано в [130], опасность возникающего градиента оценивается посредством сравнения его величины с характерными значениями $gradT_{np}^0$ и $gradT_{np}^v$, отмеченными на рис. 3.4. Первое из них $gradT_{np}^0$ представляет собой верхнюю границу абсолютно безопасных значений градиентов температуры, при которых внутренние напряжения могут вызывать в материале только упругие деформации [138]. Многократное появление таких градиентов и соответствующих внутренних механических напряжений не приводит к снижению прочности материала. Второй параметр $gradT_{np}^v$ является нижней границей абсолютно опасных значений градиентов температуры, превышение которой приводит к появлению внутренних напряжений, вызывающих выраженные и быстронарастающие разрушения структуры бетона, сопровождающиеся псевдопластическими деформациями [138, 139]. В результате этого материал становится практически непригодным для дальнейшего использования. Возникновение градиентов в диапазоне $gradT_{np}^0 < gradT < gradT_{np}^v$ приводит к появлению микроразрушений в объеме материала (бетона), а многократные нагружения вызывают постепенное снижение прочности [130, 138].

Диапазон значений $gradT_{np}^0 < gradT < gradT_{np}^v$ считается относительно безопасным, т.к., например, однократное возникновение таких градиентов, хотя и вызывает появление микроразрушений в объеме материала (бетона), не влечет недопустимого повреждения материала [130, 138, 139]. Лишь многократные появления таких градиентов вызывают постепенное снижение механической прочности бетона [130, 138, 139].

Как следует из рис. 3.4, максимальное значение градиента $gradT_{max}$ достигается в момент окончания стадии нагревания, а для двух значений скорости подъема температуры в нагревателе (6,5 и 10 °С/ч.), соответствующих приведенным выше рекомендациям (разд. 3.1), имеет

место относительно безопасный режим $gradT_{np}^0 < gradT_{max} < gradT_{np}^v$ и ближе к уровню $gradT_{np}^0$.

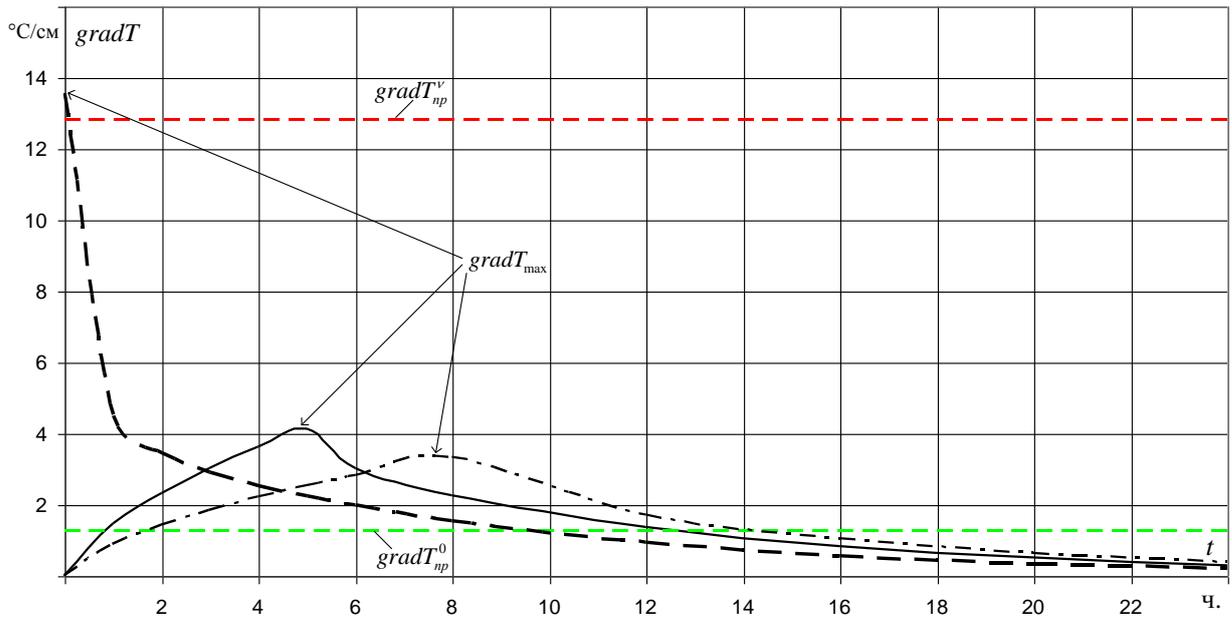


Рис. 3.4. Зависимости градиентов температуры в поверхностном слое железобетонной колонны от времени ЭТО при различной скорости роста температуры в нагревателе: пунктирные линия – $v_H = 5500$ $^{\circ}C/ч$.; сплошные – $v_H = 10$ $^{\circ}C/ч$.; штрих-пунктирные – $v_H = 6,25$ $^{\circ}C/ч$.

Следует предположить, что однократное появление таких градиентов и соответствующих им внутренних механических напряжений не приведет к повреждению материала железобетонных колонн. Однако при максимально возможной скорости подъема температуры, возникающей в случае включения нагревателей на полную мощность (рис. 3.2) значение $gradT_{max}$ достигает катастрофической величины (пунктирная кривая, рис. 3.4). Такая ситуация может возникнуть вследствие неисправности источника питания или ошибок персонала и должна быть исключена на практике.

На рис. 3.5 представлены расчетные зависимости величины $gradT_{max}$ от скорости нагревания v_H и разности температур ($T_{изот} - T_0$), которые получены посредством построения зависимостей вида рис. 3.4 и удобны для выбора режимов управления нагревателями применительно к конкретным температурным условиям. Эти зависимости свидетельствуют о том, что даже

при сравнительно высоких значениях v_H (до 20 °С/ч.), которые обычно не рекомендуются для применения на практике, величина $gradT_{max}$ со значительным запасом не достигает области абсолютно опасных значений $gradT_{np}^v$, т.е. ЭТО не должна вызывать повреждения материала внутренними механическими напряжениями. Однако эти зависимости (рис. 3.5) позволяют сделать и другой вывод, что обеспечение абсолютно безопасных условий ЭТО ($gradT_{max} \leq gradT_{np}^0$) является непростой задачей, т.к. ее решение требует применения малых значений скорости подъема температуры v_H .

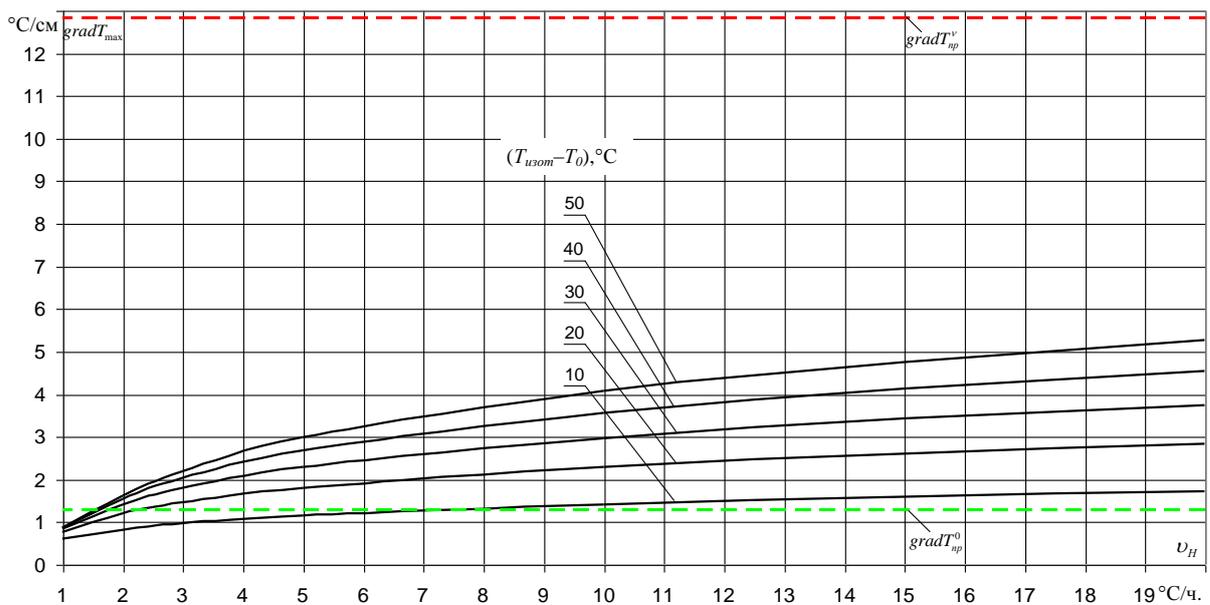


Рис. 3.5. Зависимость максимального градиента от скорости нагрева v_H и разности температур $(T_{изот}-T_0)$

Тем не менее, в дальнейшем целесообразно проведение научно-технических разработок по решению такой задачи с помощью предложенной методики [130, 138].

3.3. Характеристики температурного поля в продольном сечении железобетонных колонн при электротепловой обработке их штепсельного соединения

Результаты исследования характеристик температурного поля в поперечном сечении железобетонных колонн в ходе электротепловой обработки штепсельного соединения (разд. 3.1, 3.2) показали, что при осуществлении такого технологического процесса, несмотря на заметное отставание повышения температуры в месте расположения штепсельного стыка, заполненного свежим бетоном, по отношению к температуре нагревателя, могут быть обеспечены благоприятные условия твердения этого бетона. Однако при определенных условиях могут возникать деформации, вызванные появлением значительных температурных градиентов в объеме материала.

Эти результаты потребовали проведения аналогичных исследований не только в поперечном, но в продольном сечении железобетонных колонн, т.е. в направлении оси z (рис. 2.1 и 2.3) [137]. Расчетная методика, представленная в разд. 2.2.2, позволяет выполнить такую оценку температурных условий ЭТО штепсельного соединения в реальных условиях на примере железобетонных колонн (бетон класса В25) сечением 400х400 мм высотой 2920 мм (такие изделия наиболее часто применяются на практике [103, 112]). Расчеты выполнены для температуры окружающего воздуха $T_0 = 0$ °С (минимальное значение, при котором разрешается проведение работ сборно-монолитного строительства) и при нескольких значениях $T_{изот} = T_0 = 30, 40, 50$ и 60 °С в целях определения влияния этого фактора на условия ЭТО. Конструкция и размеры штепсельного соединения, а также устройства поверхностного прогрева приняты такие же, в предыдущих случаях (разд. 3.1 и 3.2). Результаты расчетов представлены на рис. 3.6 и получены применительно к указанной выше конструкции колонны [130,138]. При этом значение интервала решения по времени (длительность ЭТО) в выражении

(2.38) принято $\text{trange} = 24$ ч., т.к. результаты предыдущих расчетов показали, что к этому моменту времени практически полностью стабилизируются значения температуры (рис. 3.1 и 3.3), т.е. температурное поле в области прогрева штепсельного соединения приобретает стационарный характер. Кроме этого, как показали ранее выполненные исследования [130, 138] и результаты, полученные в настоящей работе (рис. 3.4), в этот момент времени градиенты температуры в объеме материала достигают максимального значения, и являются критическими относительно возможности повреждения материала внутренними механическими напряжениями. В целях сравнения для одного из значений $T_{изот} = T_0 = 50$ °C был выполнен расчет при $\text{trange} = 72$ ч. (общее время ЭТО на практике) значения $\text{grad}T_{np}^0$ и $\text{grad}T_{np}^v$.

Полученные зависимости (рис. 3.6) свидетельствуют о том, что температурное поле вдоль оси z получается весьма неоднородным. Действительно, температура $T_{z=l} = T_1(z=l) = T_2(z=l)$ на границе области прогрева ($z=\pm l$ –рис. 2.3) на 33 % меньше $T_0 = T_{изот}$ (рис. 3.6).

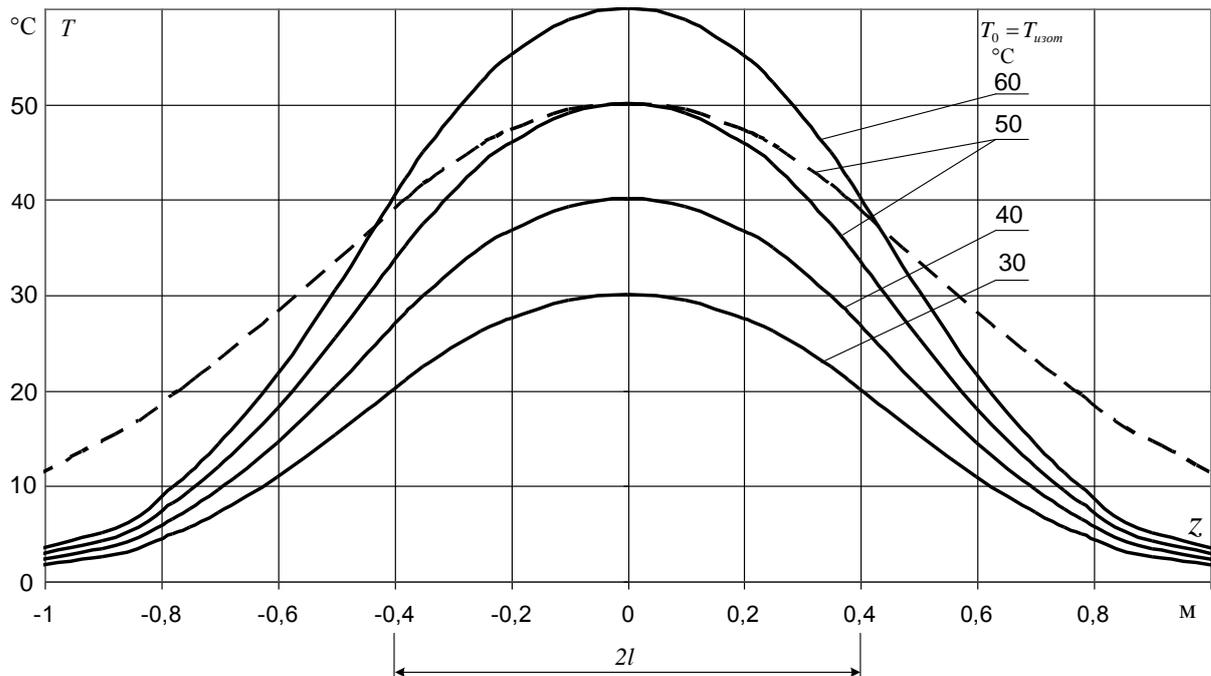


Рис. 3.6. Изменение температуры вдоль оси z при ЭТО штепсельного соединения в реальных условиях при различных значениях температуры в начале осей координат (изотермической стадии) $T_0 = T_{изот}$: сплошные линии – длительность ЭТО – 24 ч., пунктирная – длительность ЭТО – 72 ч.

Интересной особенностью температурного поля вдоль оси z является то, что это различие (33 %) при времени ЭТО 24 ч. практически не зависит от величины $T_0 = T_{изот}$ (рис. 3.6). Характерно, что к моменту окончания ЭТО (кривая для 72 ч. – рис. 3.6) температурное поле, хотя и выравнивается, но, тем не менее, продолжает оставаться неоднородным: различие между T_0 и $T_{z=l}$ снижается с 33 % до 22 %. Полученный результат (рис. 3.6) следует квалифицировать, как не очень благоприятный, т.к. он свидетельствует о неодинаковых температурных условиях твердения свежего бетона по длине штепсельного стыка. Поэтому целесообразно изучение этого вопроса, в дальнейшем, а также разработка более эффективных схем ЭТО штепсельных соединений.

На рис. 3.7 представлены зависимости изменения градиентов температуры $gradT$ вдоль оси z , полученные для тех же условий, что и кривые рис. 3.6.

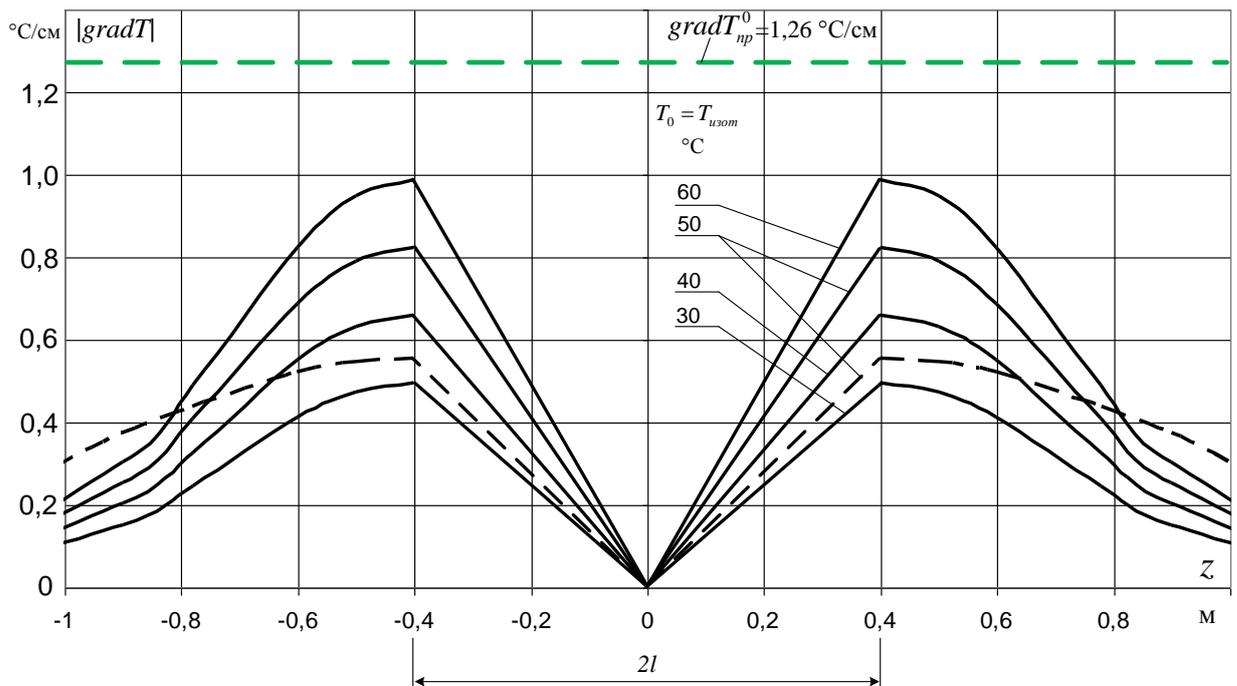


Рис. 3.7. Изменение градиента температуры (б) вдоль оси z при ЭТО штепсельного соединения в реальных условиях при различных значениях температуры в начале осей координат (изотермической стадии) $T_0 = T_{изот}$: сплошные линии – длительность ЭТО – 24 ч., пунктирная – длительность ЭТО – 72 ч.

На рис. 3.7 также отмечено характерное граничное значение $gradT_{np}^0$ (верхняя граница области абсолютно безопасных значений градиентов температуры).

Из кривых рис. 3.7 нетрудно сделать вывод, что максимальные градиенты температуры наблюдаются на границе зоны прогрева ($z=\pm l$ – рис. 2.3) в момент стабилизации температурного поля в области прогрева (длительность ЭТО – 24 ч.). Однако, в дальнейшем, с течением времени величина максимальных градиентов уменьшается (см. кривые для $T_0 = T_{изот} = 50$ °С – рис. 3.7).

Как весьма положительный результат выполненных расчетов, следует считать тот факт, что значения градиентов температуры (рис. 3.7) всегда находятся в области абсолютно безопасных значений, т.е. всегда меньше верхней границы $gradT_{np}^0$ [127, 130, 137, 138].

Следует также отметить, что температурное поле вдоль железобетонной колонны за пределами области прогрева $z \geq l$ имеет весьма неоднородный характер при нелинейном характере изменения температуры вдоль оси z . Этот факт не имеет большого практического значения и на рис. 3.6 и 3.7 по этой причине область построения была ограничена $z \pm 1$ м. Расчеты также показали, что даже при максимальных значениях $T_{изот} = T_0 = 60$ °С и времени ЭТО в 72 ч. температура при $z \geq 1,6 \div 1,8$ м остается неизменной и равной начальному значению $T_0 = 0$ °С на протяжении остальной части колонны до значения $z = h = 2,92$ м, т.е. на участке длиной $1,12 \div 1,32$ м (рис. 2.3).

3.4. Выводы и рекомендации по применению электрообогрева при получении штепсельных соединений железобетонных колонн

Результаты теоретических исследований характеристик нестационарного температурного поля в ходе ЭТО штепсельных соединений железобетонных колонн (сечение 400x400 мм), представленные в этой главе и выполненные с помощью предложенных в настоящей работе расчетных методик применительно к реальным условиям позволили сформулировать ряд выводов.

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. Выполненные исследования показали, что 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 ν_H , разность температуры изотермической выдержки и начальной температуры – $(T_{изот} - T_0)$ и толщина воздушного зазора H_g 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.

4. Однако на практике возможно появление опасных значений градиентов температуры в поперечном сечении колонны в области прогрева на стадии нагревания, например при включении нагревателей на полную мощность при минимальном значении начальной температуры; это может произойти в результате неисправности источника питания и его системы управления, а также неправильных действий оператора, необходимо устранить возможность появления таких ситуаций, например, посредством применения надежных средств защиты источника питания.
5. Выполненные исследования свидетельствуют о неодинаковых температурных условиях твердения свежего бетона, уложенного в стыки штепсельных соединений железобетонных колонн в ходе ЭТО этих узлов из-за существенного перепада температуры по длине стыка, достигающего значения 33 % от температуры изотермической выдержки; необходимы дополнительные исследования этого фактора и разработки мер по устранению его негативных последствий.
6. Результаты изучения величины градиентов температуры убедительно демонстрируют отсутствие опасности повреждения материала железобетонных колонн внутренними механическими напряжениями, вызванных градиентами температуры в направлении оси колонны (оси z), в ходе ЭТО штепсельных соединений; практическое значение этого вывода трудно переоценить, т.к. в случае появления подобных повреждений, они распространялись бы по всему поперечному сечению колонн и означали бы полную непригодность конструкции для эксплуатации.
7. Расчетные методики, предложенные в настоящей работе, а также принципы, на которых они построены, целесообразно, в дальнейшем, использовать для совершенствования и оптимизации процессов ЭТО как в рассматриваемом случае, так и применительно к другим объектам такой обработки.

8. Несмотря на то, что результаты теоретических исследований качественно хорошо согласуются с современными физическими представлениями о процессах теплопереноса, требуется экспериментальная проверка выполненных теоретических разработок и результатов, полученных на их основе.

ГЛАВА 4. Экспериментальные исследования показателей и характеристик процесса электротермической обработки штепсельного соединения в лабораторных условиях

В ходе проведения научно-технических разработок, посвященных созданию надежных штепсельных соединения железобетонных колонн при монтаже сборно-монолитных конструкций, необходимо проведение серии экспериментальных исследований в лабораторных условиях. Во-первых, требуется экспериментальная проверка достоверности теоретических разработок и результатов их применения (гл. 2,3), посвященных изучению характеристик температурных полей в процессе ЭТО штепсельных соединений. Проведение таких исследований на реальном объекте затруднено, в связи с влиянием многих факторов (изменяющаяся температура окружающего воздуха, остановка строительно-монтажных работ и т.д.). Более удобным и выполнимым является вариант проведения исследования характеристик температурного поля в лабораторных условиях на макете, который в максимальной степени соответствует реальной конструкции. Во-вторых, учитывая комплексный подход к решению задачи получения надежного штепсельного соединения, существует ряд смежных задач (определение характеристик бетонной смеси для укладки в штепсельный стык, показатели механической прочности штепсельного стыка и др.), решение которых возможно только посредством лабораторных экспериментов.

4.1. Исследование характеристик температурного поля в объеме материала с использованием макета штепсельного соединения.

В целях подтверждения достоверности упомянутых выше расчетных методик (разд. 2.2, 2.3) 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. 4.1.

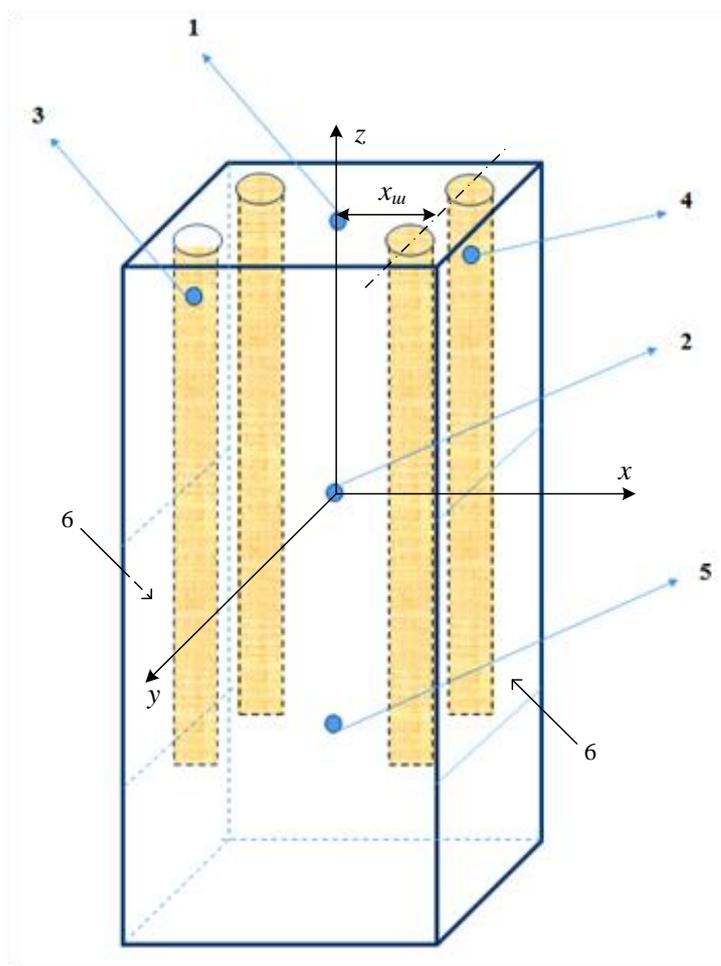


Рис. 4.1. Конструкция лабораторного макета штепсельного соединения железобетонных колонн и схема расположения термодатчиков в объеме макета: 1 – термодатчик в середине поперечного сечения колонны верхней части штепсельного соединения на расстоянии 150 мм от верхней торцевой поверхности колонны; 2 – термодатчик 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.

Лабораторный макет имеет следующие параметры. Сечение железобетонной колонны составляет 300x300 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.

Выбор меньшего поперечного сечения макета по сравнению с ранее использованным значением (400x400 мм) обусловлен тем, что, во-первых, колонны с таким сечением (300x300 мм) также достаточно широко применяются на практике [103] и поэтому результаты эксперимента будут иметь практический интерес, во-вторых, таким способом удастся проверить универсальность расчетных методик, в-третьих, макет с такими размерами доступен для транспортировки в лабораторию. Размеры частей колонн, выступающих за пределы области прогрева, с учетом дополнительных бетонных элементов (рис. 4.2,а) составили $(h-l)=100$ мм.

Плоские электронагреватели для поверхностного электропрогрева установлены на две противоположные вертикальные поверхности колонны и имеют высоту 800 мм соответствующие высоте штепсельных стыков. 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 термодпар, расположение которых представлено на рис. 4.1, 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 (коэффициент теплопроводности $\lambda_{мс} = 0,04$ Вт/(м·К) толщиной 50 мм. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 4.2.

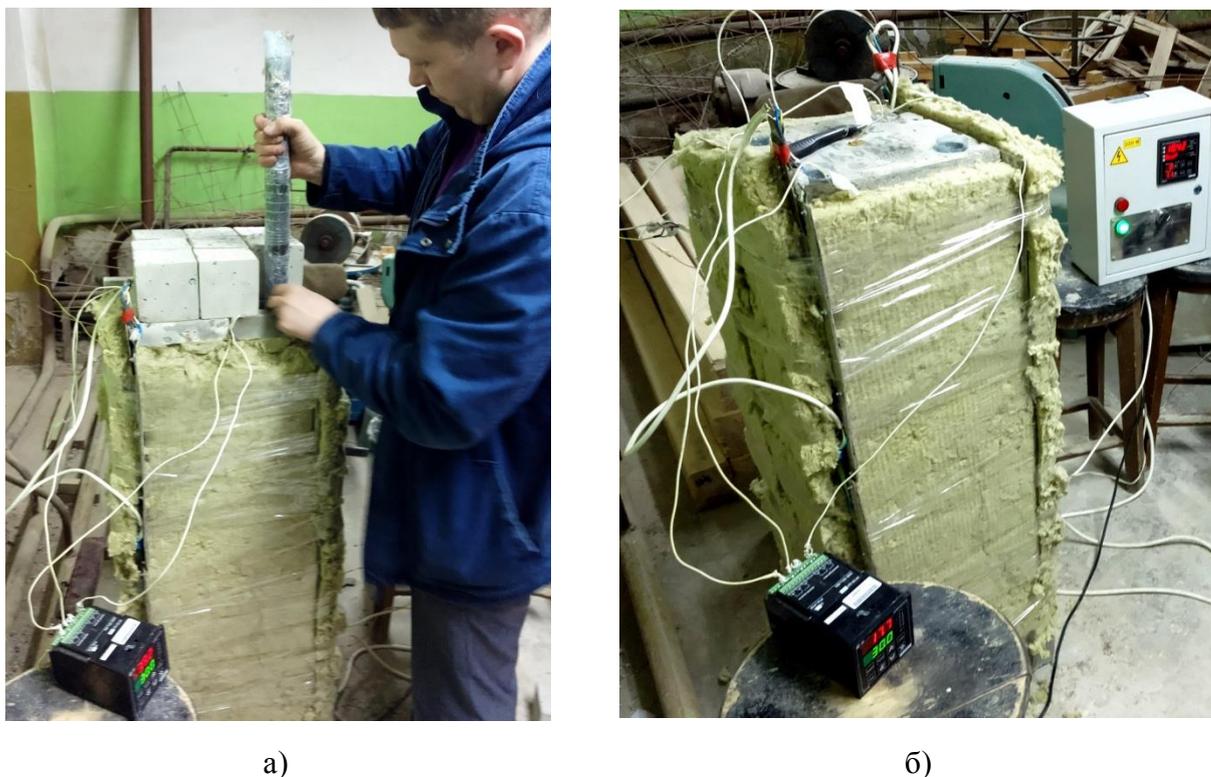


Рис. 4.2. Внешний вид экспериментальной установки при подготовке к эксперименту (а) и в ходе его выполнения (б)

В процессе эксперимента после подачи напряжения на электронагреватели производилась периодическая регистрация температуры самих нагревателей и в различных точках макета штепсельного соединения (рис. 4.1 и 4.2) 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. 4.3 представлены экспериментальные и расчетные зависимости температуры от времени, полученные по результатам опыта и вычислений с использованием предложенной методики (разд. 2.2) [130, 137].

Важной особенностью применения расчетной методики (разд. 2.2) при получении расчетных зависимостей рис. 4.3 является то, что при вычислениях толщина воздушной прослойки между поверхностью электронагревателя и бетона была принята равной $H_g = 0,45$ мм (см. рис. 2.2).

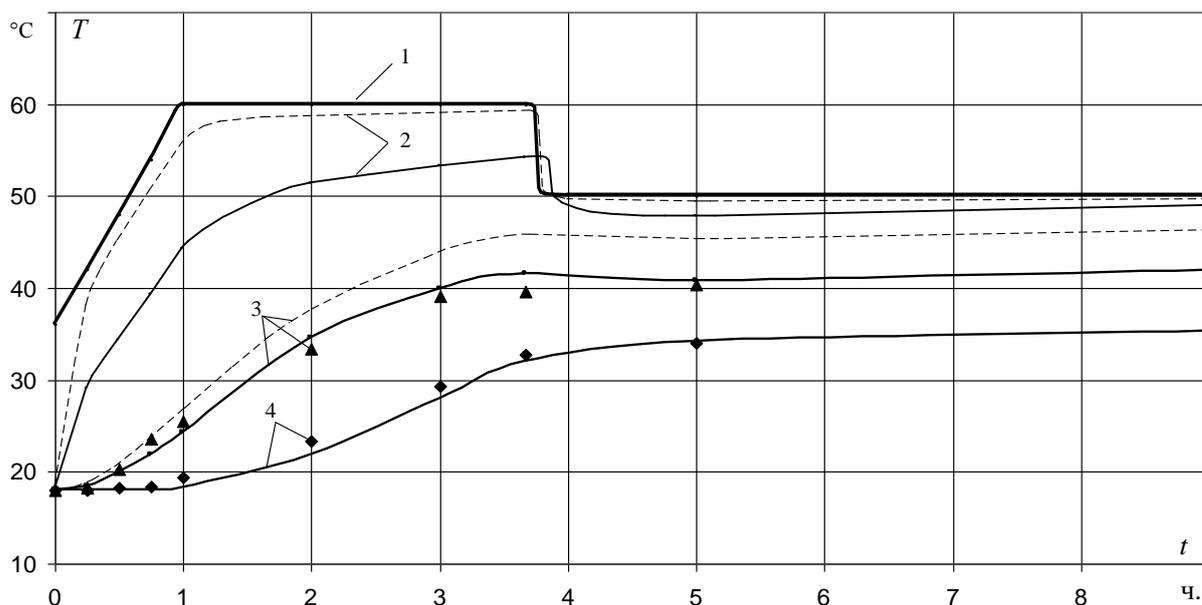


Рис. 4.3. Изменение температуры в различных точках опытной установки во времени: 1 – температура нагревателей (эксперимент); 2 – температура на поверхности бетона в месте расположения электронагревателей (расчет); 3 – температура в месте расположения (на оси, $x_{ш} = \pm 97,5$ мм) штепсельного стыка (точки – эксперимент, линия – расчет); 4 – температура на оси железобетонной колонны в т. 2 – рис. 1 (точки – эксперимент, линия – расчет); сплошная линия – расчет при $H_g = 0,45$ мм; пунктирная линия – расчет при $H_g = 0,05$ мм

Это значение было получено по результатам измерения фактического зазора между поверхностью электронагревателя и бетоном с помощью набора щупов после завершения подготовки лабораторного макета (рис. 4.1 и 4.2) к проведению эксперимента. Такое значение указанного параметра существенно превышает ту величину, что использовалась в предыдущих расчетах (рис. 3.1, $H_g = 0,05$ мм, пунктирные линии – рис. 4.3), которая была получена на основании анализа нормативных документов [57], нормирующих 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 [130, 138, 139]. На основании анализа этих литературных сведений, учитывая, что для изготовления железобетонных колонн и опытного макета (рис. 4.1 и 4.2) применяется бетон класса В25 в возрасте более 28 суток, а диапазон изменения температуры в опыте не выходил за рамки $10\div 60$ °С было принято в расчетах значение этого показателя $\lambda_6 = 1,5$ Вт/(м·К).

Особенностью выполненного эксперимента является не совсем типичный график изменения температуры нагревательных элементов в ходе опыта (т.е. график тепловой обработки, кривая 1 – рис. 4.3), когда их температура в течение одного часа достигла 60 °С. Затем после истечения 2,7 ч. температура была снижена до 50 °С и далее оставалась неизменной. Это было сделано для того 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 – рис. 4.3) уже достигла и превысила 40 °С. Как показывают расчеты, представленные на рис. 3.3, если температура нагревателей при изотермической стадии составляет $T_{изот} = 40$ °С, то температура в месте стыка достигает такого значения лишь спустя 20÷22 ч. после начала тепловой обработки. Эти результаты (рис. 3.3, 4.3) лишний раз подтверждают удобство, гибкость и широкие возможности поверхностного электронагрева в управлении процессом тепловой обработки рассматриваемого объекта по сравнению с традиционными методами. Другой причиной применения такого графика теплового воздействия (кривая 1 – рис. 4.3) является проверка корректной работы предложенной методики расчета (разд. 2.2) в более сложных условиях. Действительно, в разд. 2.2 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 $T_{изот} = 60$ °С, и стадия изотермической выдержки при $T_{изот} = 50$ °С. Дополнительным усложнением расчетов является то, что начальная температура при $t = 0$ нагревателя существенно выше температуры бетона, что видно из сравнения кривой 1 и зависимостей 2÷4 (рис. 4.3), что было обусловлено особенностями принципа действия автоматизированной системы электропитания нагревателей опытной установки (рис. 4.2).

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 (разд. 2.2) и возможности ее применения на практике (гл. 3). 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, как отмечалось выше [130]. Он определяет величину внутренних механических напряжений в материале и возможность необратимого и недопустимого его механического повреждения в ходе электротепловой обработки [130]. Надо сказать, что опытное определение величины этого параметра представляет собой сложную задачу. Однако

предложенная методика расчета характеристик температурного поля, как показано в гл. 2 и 3, позволяет определять величину этого параметра в любой точке материала, а успешная экспериментальная проверка (рис. 4.3) дает основание доверять результатам таких расчетов. Поэтому одновременно с получением расчетных зависимостей рис. 4.3 была получена расчетная кривая изменения во времени градиента температуры на поверхности бетона, к которой прилегает поверхность нагревателя (рис. 4.12). Расчеты (гл. 3) показали, что именно в этой части материала возникают максимальные значения градиента температуры и наибольшая опасность повреждения материала.

На рис. 4.4 представлена расчетная кривая изменения во времени величины градиента температуры $gradT$ в поверхностном слое бетона, полученная в соответствии с условиями эксперимента (рис. 4.3).

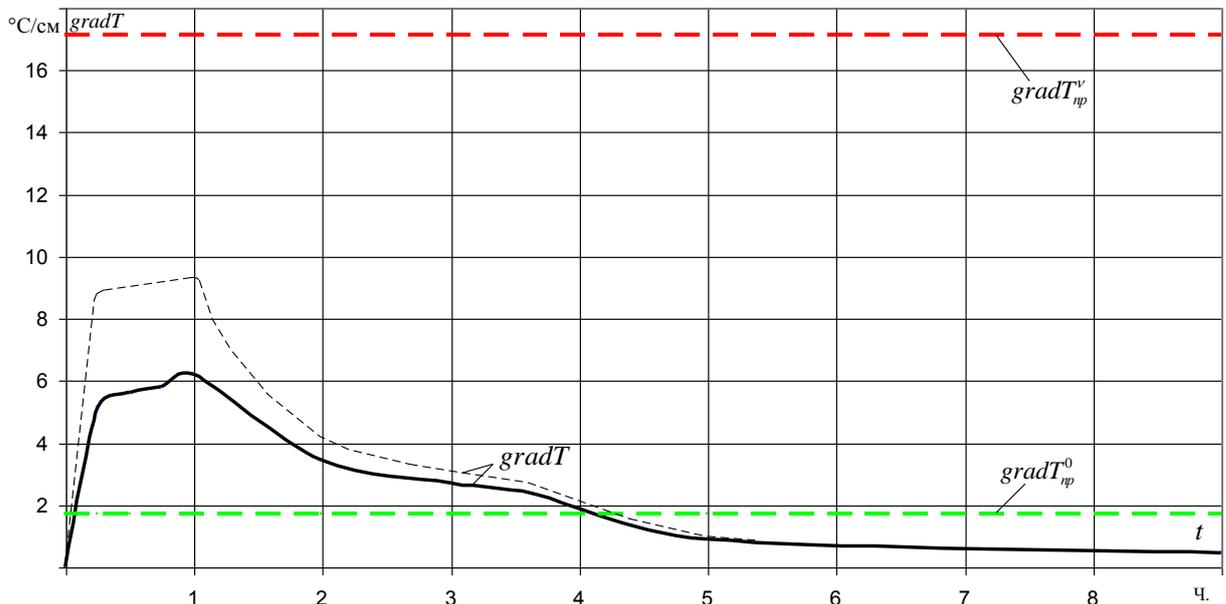


Рис. 4.4. Изменение градиента температуры во времени в поверхностном слое бетона в ходе опыта на лабораторном макете (рис. 1÷3): сплошная линия – расчет при $H_g = 0,45$ мм; пунктирная линия – расчет при $H_g = 0,05$ мм

Из рис. 4.4 следует, что максимальное значение этого параметра достигается в момент окончания стадии нагревания, что полностью согласуется с результатами теоретических исследований (рис. 3.4) и с

аналогичным результатом, полученным ранее при исследовании характеристик электротепловой обработки электродным методом токами повышенной частоты [130]. Как показано в [130] и гл. 3, опасность возникающего градиента оценивается посредством сравнения его величины с характерными значениями $gradT_{np}^0$ и $gradT_{np}^v$, отмеченными на рис. 4.4.

Как было отмечено в разд. 3.2, возникновение градиентов в диапазоне $gradT_{np}^0 < gradT < gradT_{np}^v$ приводит к появлению микроразрушений в объеме материала (бетона), а многократные нагружения вызывают постепенное снижение прочности [80, 190]. Именно такая ситуация, как следует из рис. 4.4, наблюдается в рассматриваемом случае, т.к. на протяжении первых четырех часов величина градиента температуры находится в указанном диапазоне. Как отмечено также в разд. 3.2, одно-, двукратное появление таких градиентов не должно повлечь недопустимого повреждения материала, а однократную электротепловую обработку опытного макета (рис. 4.1÷4.3) следует считать безопасной [130, 138].

В [130] показано, что величина $gradT_{np}^0$ и $gradT_{np}^v$ определяется двумя факторами: пределом прочности бетона на сжатие и размером изделия в поперечном сечении. Значения этих параметров, отмеченные на рис. 4.4, определены для бетона класса В25, который получил широкое применение при изготовлении железобетонных колонн сборно-монолитного строительства, и размера поперечного сечения 300x300 мм лабораторного макета (рис. 4.1 и 4.2).

Результаты, представленные на рис. 4.3 и 4.4, также свидетельствуют о достаточно заметном влиянии толщины воздушного зазора H_g на характеристики температурного поля: с одной стороны, уменьшение этого параметра позволяет несколько ускорить прогрев материала (см. пунктирную и сплошную кривые 3 – рис. 4.3), с другой, за это приходится расплачиваться ростом максимальных градиентов приблизительно в 1,5 раза (рис. 4.4).

Вполне очевидно, что интерес представляют результаты экспериментального исследования температурных характеристик не только в поперечном сечении колонн (макета), но и в продольном. На рис. 4.5 и рис. 4.6 представлены результаты эксперимента на макете (рис. 4.2) и расчета с использованием методики, представленной в разд. 3.3, изменения температуры и градиента температуры (по абсолютной величине), соответственно, вдоль оси z (рис. 4.1).

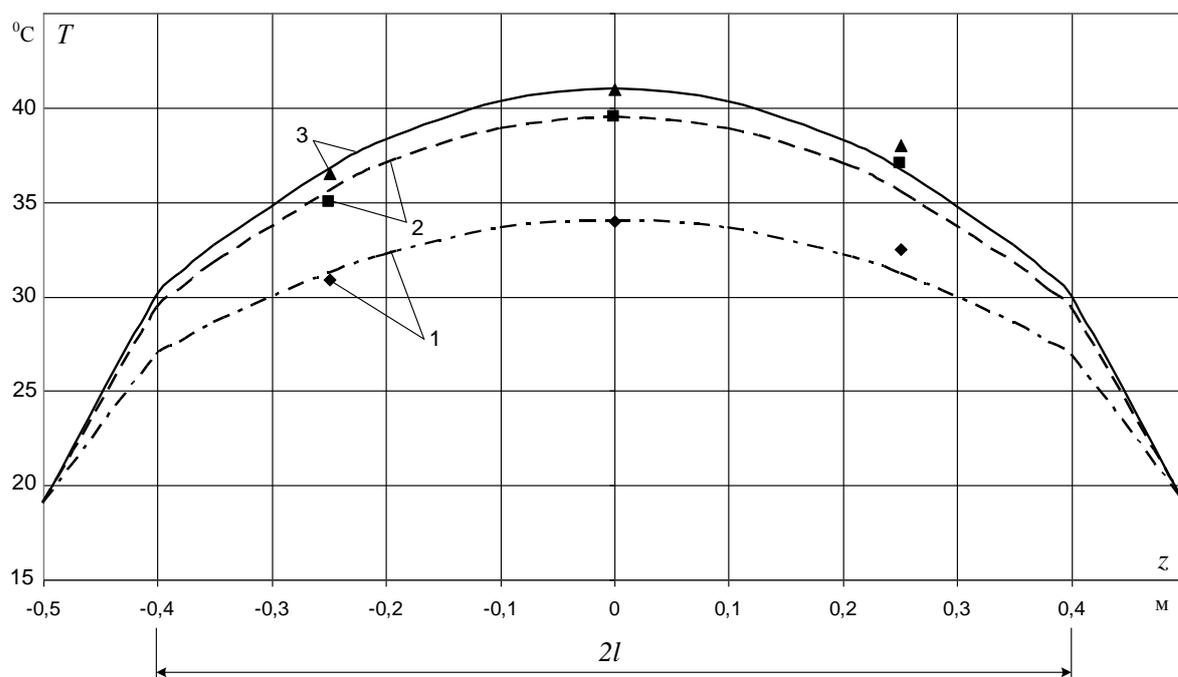


Рис. 4.5. Изменение температуры вдоль оси z в ходе ЭТО макета штепсельного соединения (рис. 2) в различные моменты времени t : 1 – $t = 4$ ч. 40 мин; 2 – $t = 24$ ч.; 3 – 72 ч.; линии – расчет; точки – эксперимент

Поскольку погрешность измерения температуры в опыте (рис. 4.2) составляет $\pm 2 \div 5$ °C [92], можно сделать вывод о хорошей сходимости результатов расчета и эксперимента (рис. 4.5) и пригодности предложенной расчетной методики (разд. 2.3) для прогнозирования характеристик температурного поля при ЭТО штепсельных соединений в реальных условиях (гл. 3).

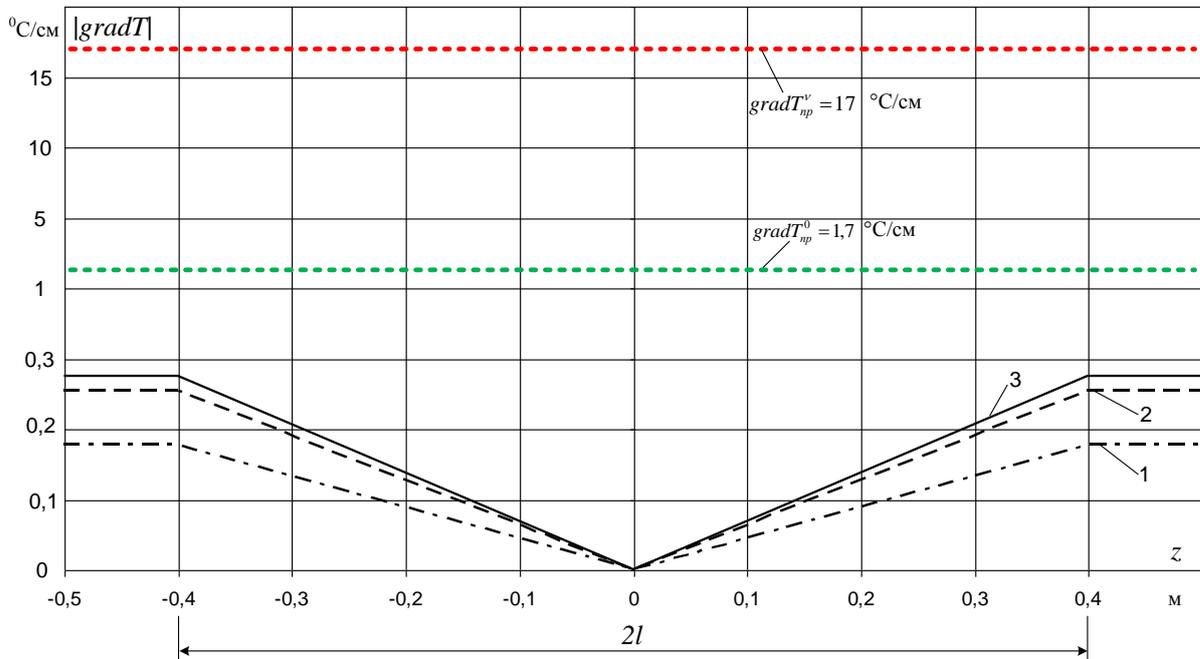


Рис. 4.6. Расчетные зависимости изменения градиентов температуры вдоль оси z в ходе ЭТО макета штепсельного соединения (рис. 4.2) в различные моменты времени t : 1 – $t = 4$ ч. 40 мин; 2 – $t = 24$ ч.; 3 – 72 ч.

Из рис. 4.6 можно сделать вывод, что градиенты продольного температурного поля, возникающие при ЭТО макета (рис. 4.2), в условиях лабораторного эксперимента с большим запасом соответствуют области абсолютно безопасных значений, и опасность повреждения материала в этом случае полностью отсутствует.

4.2. Исследование характеристик и выбор рационального состава самоуплотняющегося бетона, предназначенного для заполнения штепсельных соединений железобетонных колонн на основании результатов лабораторных экспериментов.

В соответствии с обоснованием, описанным в разд. 3.4, было исследовано влияние содержания добавок PCE суперпластификаторов Glenium-51, Glenium ACE 430, Glenium C 323MIX компании BASF на растекаемость, сроки схватывания и среднюю плотность цементных паст. В

качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Б производства ОАО «Мордовцемент». Добавки вводились в цементное тесто нормальной густоты при соотношении вода: цемент = 29,75 %. Содержание РСЕ суперпластификаторов в цементных пастах варьировалось от 0,1 до 2,0 % от массы цемента. Для контроля растекаемости цементных паст при постоянном водоцементном отношении 29,75 % применялся конус Хегерманна [5].

На рис. 4.7 отражено влияние содержания исследуемых модифицирующих добавок на растекаемость цементных паст при постоянном водоцементном отношении.

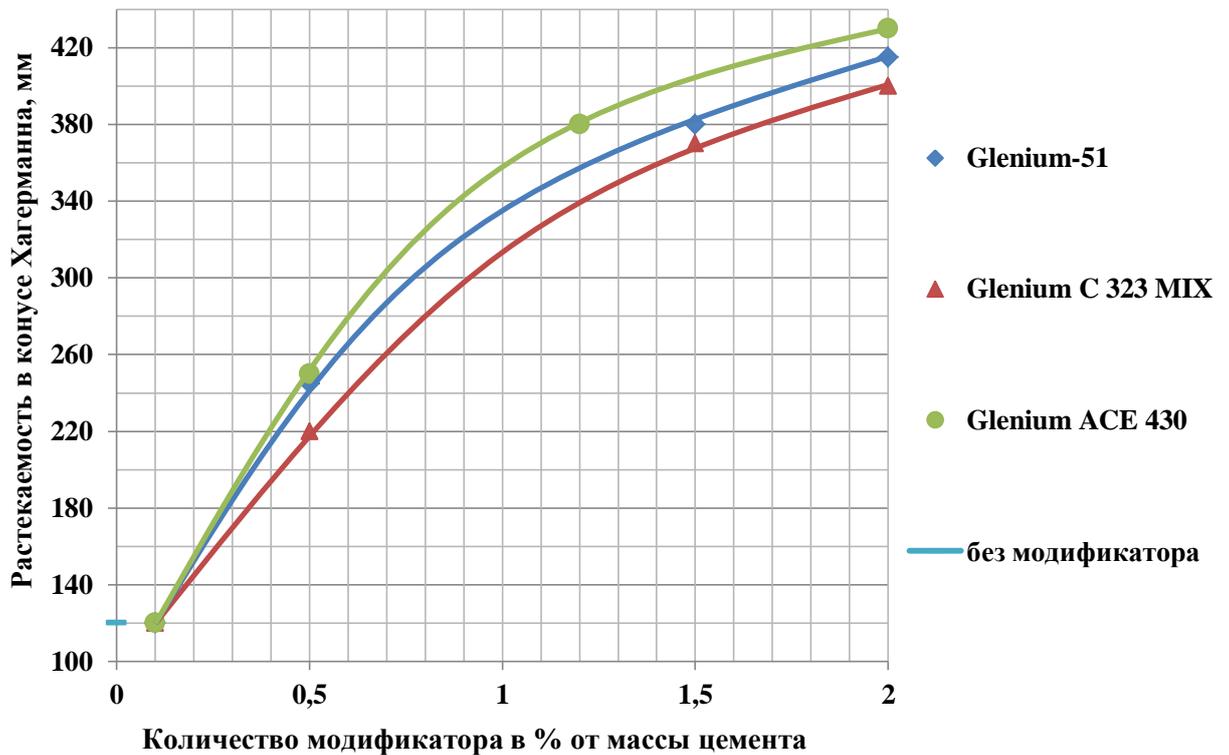


Рис. 4.7. Влияние содержания суперпластификаторов Glenium-51, Glenium ACE 430, Glenium C 323MIX на растекаемость цементных паст при постоянном водоцементном отношении

Исследования показали, что графики зависимости растекаемости цементных паст от содержания всех трех РСЕ суперпластификаторов (Glenium-51, Glenium ACE 430 и Glenium C323MIX) практически идентичны: разница в расплыве паст при использовании различных суперпластификаторов при равном их расходе не превышает $\pm 4,0$ %. При

повышении содержания РСЕ суперпластификаторов растекаемость паст увеличивается [5]. Интервал наиболее активного роста растекаемости соответствует повышению содержания РСЕ суперпластификаторов от 0,1 до 1,5 % от массы цемента: диаметр расплыва паст при испытании в конусе Хегерманна повышается со 120 мм до 370...400 мм, то есть увеличивается более чем в 3 раза.

При дальнейшем увеличении содержания РСЕ суперпластификаторов от 1,5 до 2,0 % от массы цемента прирост диаметра расплыва паст для каждой из трех добавок не превышает 10 %.

Установлено, что с повышением содержания РСЕ суперпластификаторов не только повышается растекаемость паст, но и увеличивается период времени от момента затворения до конца их схватывания [5]. На рис. 4.8 представлена зависимость конца схватывания цементных паст от вида и содержания добавок при постоянном водоцементном отношении.

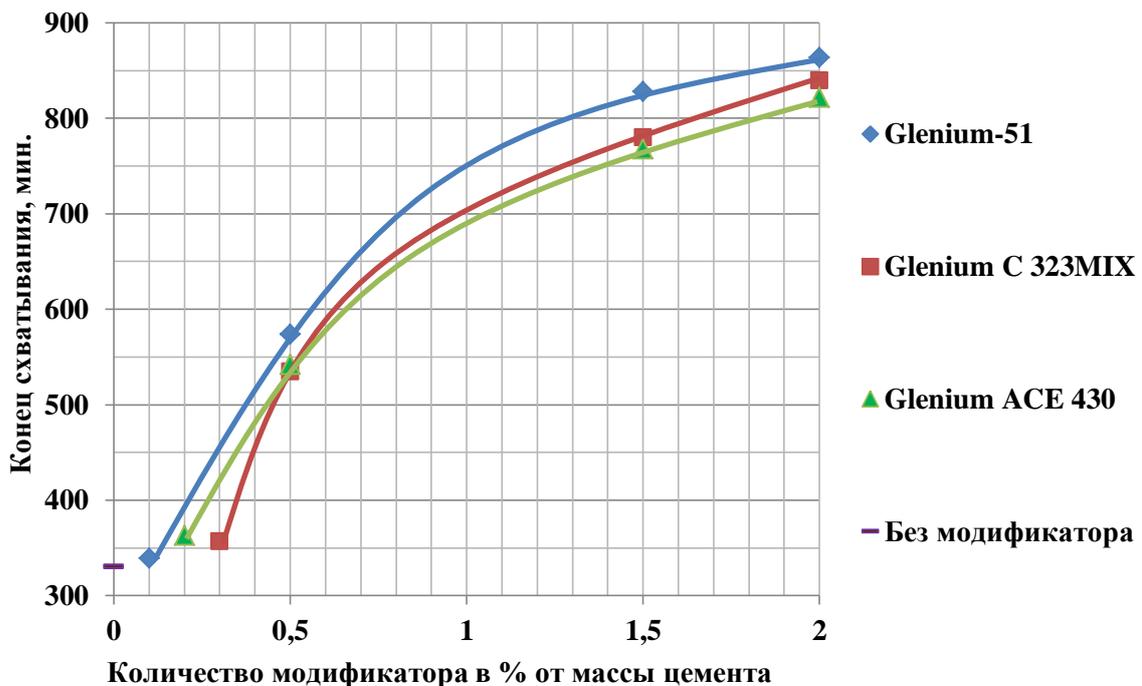


Рис. 4.8. Влияние содержания суперпластификаторов Glenium-51, Glenium ACE 430, Glenium C 323MIX на конец схватывания цементных паст при постоянном водоцементном отношении и температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Анализ полученной зависимости показал, что влияние суперпластификаторов Glenium-51, Glenium ACE 430 и Glenium C 323MIX на схватывание цементных паст практически не отличается. При минимальных дозировках суперпластификаторов Glenium-51, Glenium ACE 430 и Glenium C 323MIX в пределах от 0,1 до 0,3 % от массы цемента конец схватывания наступает позднее на 9...35 минут в сравнении с немодифицированным составом. При дальнейшем повышении содержания суперпластификаторов время схватывания значительно увеличивается. Так, при дозировке добавок в количестве 0,5 % от массы цемента окончание схватывания наступает позднее на 3,5...4,0 часа. Повышение содержания суперпластификаторов до 1,5 % увеличивает период времени от момента затворения до конца схватывания в сравнении с немодифицированным составом на 7,0...8,0 часов. При дальнейшем повышении содержания PCE суперпластификаторов от 1,5 до 2,0 % от массы цемента приращение времени до конца схватывания составляет 1 час.

На рис. 4.9 представлена экспериментальная зависимость средней плотности цементного камня от содержания модифицирующих добавок.

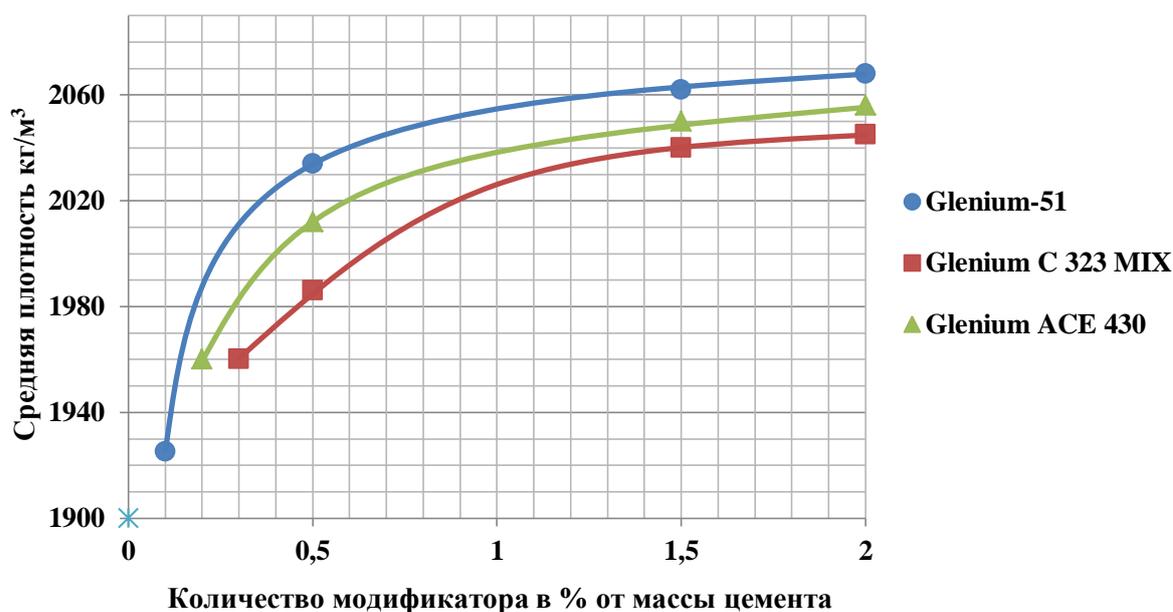


Рис. 4.9. Влияние содержания суперпластификаторов Glenium-51, Glenium ACE 430, Glenium C 323MIX на среднюю плотность цементного камня.

Исследования показали, что увеличение количества суперпластификаторов Glenium-51, Glenium ACE 430 и Glenium C 323MIX в рецептуре цементных паст повышает их способность к самоуплотнению. В качестве критерия самоуплотнения рассмотрено изменение средней плотности исследуемых составов. Наибольшую способность к самоуплотнению проявил суперпластификатор Glenium 51. Увеличение содержания суперпластификатора Glenium 51 с 0,1 до 2,0 % от массы цемента повысило среднюю плотность цементного камня с 1920 до 2070 кг/м³ (рис. 4.9).

Результаты исследования позволяют сделать вывод о существовании связи между увеличением периода схватывания и повышением средней плотности цементного камня с поликарбоксилатными суперпластификаторами.

Разработка составов самоуплотняющихся смесей для замоноличивания стыков выполнялась с использованием местного речного мелкозернистого кварцевого песка с модулем крупности 1,2. По содержанию примесей кварцевый песок пригоден для стекольного производства. Зерновой состав природного кварцевого песка приведен в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Зерновой состав природного кварцевого песка

	Размер отверстий сит, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,16
Полные остатки, %	0,04	0,12	1,79	24,89	93,26	100

Согласно ГОСТ 8736-2014 кварцевый песок по модулю крупности 1,2 относится к группе очень мелких песков.

Для повышения стойкости смесей к расслаиванию часть сухого природного кварцевого песка размалывалась до удельной поверхности 100 м²/кг. В составы вводились смеси кварцевого песка и кварцевого наполнителя. Для приготовления составов самоуплотняющихся смесей применялись суперпластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров - Glenium[®] 51 и Glenium SKY[®] 505 производства компании «BASF».

В качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5Б (ГОСТ 31108-2003) производства ОАО «Мордовцемент» с удельной поверхностью 360 м²/кг. Портландцемент имел следующий минералогический состав: C₃S=62,0 %, C₂S=14,0 %, C₃A=6,5 %, C₄AF=12,0 %. Портландцемент содержал 4,5 % активной минеральной добавки – опоки.

Из составов заливались образцы – кубы с ребром 70,7 мм, которые хранились в нормальных условиях при температуре +20±2°С и влажности воздуха 95±5 %. Самоуплотняющиеся составы с растекаемостью смесей в конусе Хегерманна 240–270 мм были получены при содержании суперпластификаторов в количестве 1,5 % от массы цемента. Составы модифицированного мелкозернистого бетона приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Составы модифицированного мелкозернистого бетона

№ п/п	Состав сухой смеси, %			В/Ц	Содержание суперпластификатора, % от массы цемента	
	цемент	песок	наполнитель		Glenium®51	Glenium®SKY 505
1	50	37,5	12,5	0,34	1,5	-
2	50	34,4	15,6	0,34	1,5	-
3	50	31,3	18,7	0,34	1,5	-
4	50	37,5	12,5	0,36	-	1,5
5	50	34,4	15,6	0,36	-	1,5
6	50	31,3	18,7	0,36	-	1,5

Исследования показали, что полученные составы самоуплотняющихся смесей обладают повышенной текучестью, выражаемой в способности свободно проникать в отверстия диаметром до 4 мм. Испытание образцов кубов на третьи сутки твердения показали, что их прочность при сжатии не превышает 13,5 МПа. Результаты исследования кинетики роста прочности при сжатии составов 1-6 (табл. 4.2) приведены на рис. 4.10 и 4.11. Анализ результатов показал, что все составы имеют схожую кинетику твердения.

Установлено, что образцы, содержащие 1,5 % от массы цемента суперпластификаторов Glenium®51 и Glenium®SKY 505 характеризуются низкой ранней прочностью: через 3 суток твердения предел прочности при сжатии образцов составил около 30 % прочности составов в возрасте 28

суток. При этом составы № 1-3 (табл. 4.2) модифицированные суперпластификатором Glenium®51 в возрасте 28 суток приобретают прочность в среднем на 40 % выше прочности составов № 4-6 (табл. 4.2) с добавкой Glenium®SKY 505.

При дальнейшем хранении образцы продолжают набирать прочность.

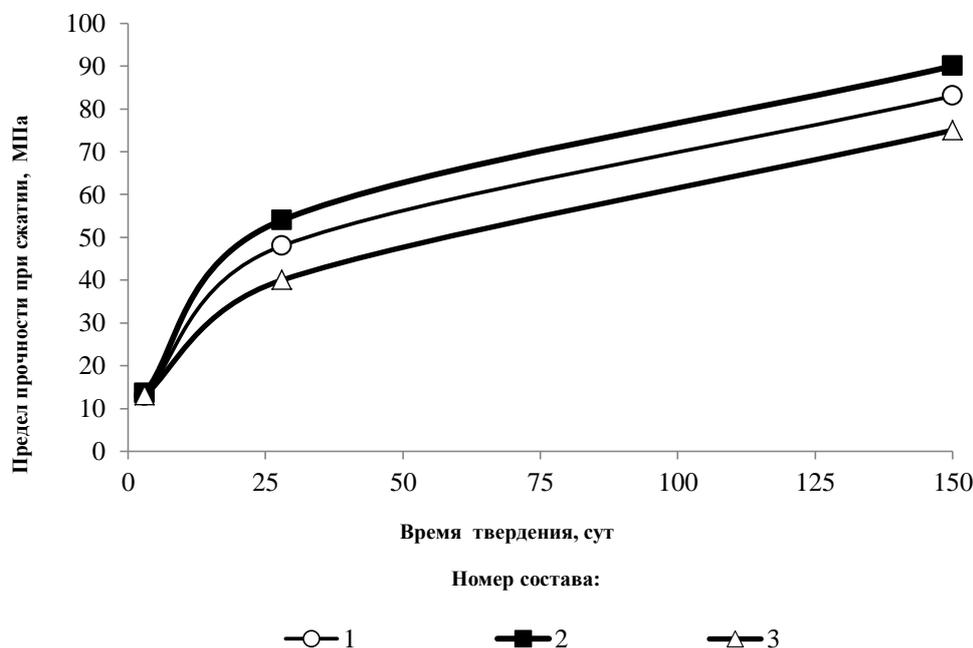


Рис. 4.10. Кинетика роста во времени предела прочности при сжатии, МПа, образцов самоуплотняющихся смесей с содержанием 1,5 % от массы цемента суперпластификатора Glenium®51

В возрасте 150 суток составы № 1-3, (табл. 4.2) модифицированные суперпластификатором Glenium®51 приобретают прочность в среднем на 23 % выше прочности составов № 4-6 (табл. 4.2) с добавкой Glenium®SKY 505.

Полученные результаты объясняются показателем водоцементного отношения (табл. 4.2), определяющего формирование плотности исследуемых составов и его влияния на формирование предела прочности при сжатии.

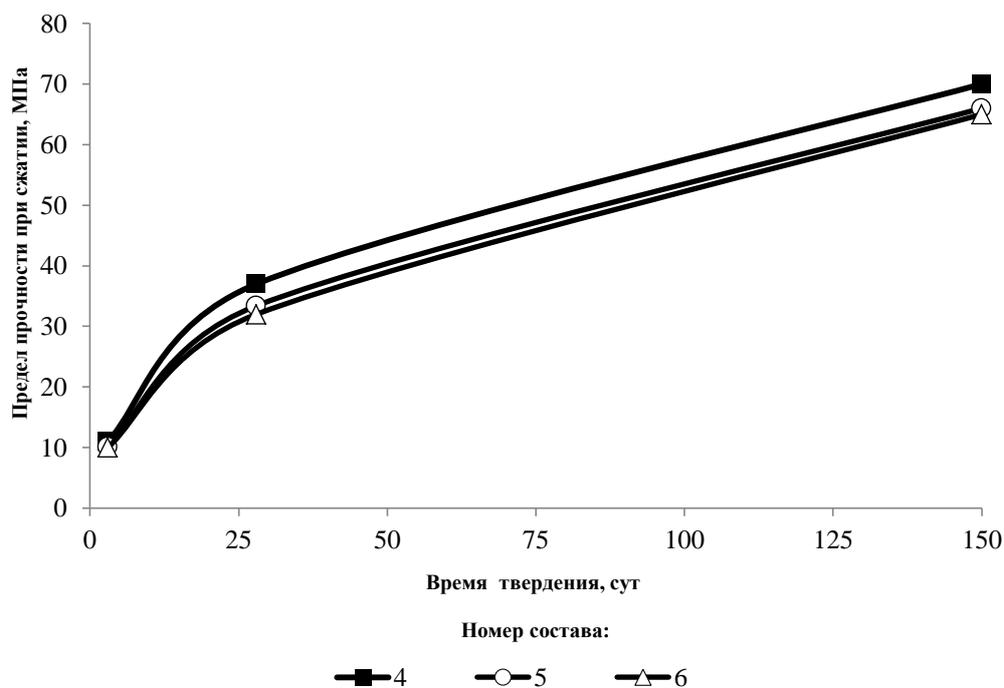


Рис. 4.11. Кинетика роста прочности при сжатии, МПа, образцов самоуплотняющихся смесей с содержанием 1,5 % от массы цемента суперпластификатора Glenium®SKY 505

С учетом повышенных требований к самоуплотняемости и текучести смесей, применяемых для заполнения стыков перекачиванием через отверстие диаметром 4 мм, для практического использования рекомендован состав №4 (табл. 4.2) с модификатором Glenium-SKY®505. Состав №4 имеет расплыв 270 мм при испытании в конусе Хагермана и прочность при сжатии через 28 суток 37 МПа.

Сравнительная оценка эффективности применения двух суперпластификаторов на основе поликарбоксилатного эфира показывает, что самоуплотняющаяся смесь, модифицированная добавкой Glenium® 51, обладает более низким водоцементным отношением, что оказывает положительное влияние на возможность снижения усадочных деформаций [147].

В окончательном виде для укладки штепсельные стыки предложен следующий состав мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси, включающей портландцемент ЦЕМ I 42.5Н с удельной поверхностью 360 м²/кг, чистый кварцевый песок с модулем крупности $M_{кр}=1,9$, молотый

кварцевый наполнитель с удельной поверхностью 100 м²/кг, суперпластификатор на основе поликарбоксилатного эфира Glenium® ACE 430 и ускоритель твердения X-SEED 100® на основе суспензии гидросиликата кальция [96].

Мелкозернистая самоуплотняющаяся бетонная смесь приготавливается в следующем порядке: твердые компоненты смеси (цемент, песок и кварцевый наполнитель) затворяются водой и перемешиваются до получения однородной массы; после перемешивания добавляются суперпластификатор на основе поликарбоксилатного эфира Glenium® ACE 430, ускоритель твердения X-SEED 100® на основе суспензии гидросиликата кальция и смесь дополнительно перемешивается до приобретения литой консистенции: расплыв смеси при испытании в конусе Хегерманна – 220-240 мм.

Важным преимуществом предложенной мелкозернистой бетонной смеси наливного типа является то, что она должна вызывать коррозию арматуры, так как в ее составе отсутствуют солевые компоненты. В табл. 4.3 приведены показатели двух вариантов предложенной бетонной смеси.

Таблица 4.3

Показатели разработанной бетонной смеси

Сост ав №	Состав смеси, масс. %						Водотвердое отношение	Расплыв смеси в конусе Хегерманна, мм	Предел прочности при сжатии, МПа		
	Цемент, Суд.=360 м ² /кг	Кварцевый песок, M _{кр} =1,9	Кварцевый наполнитель, Суд.=100 м ² /кг	Glenium® ACE 430	X-SEED 100®	Вода			1 сутки	2 сутки	3 сутки
1	44,2	33,1	11,1	0,3	0,2	11,1	0,128	220-240	20	38,5	50,2
2	44,7	39,1	5,6	0,4	0,2	10	0,112	220-240	22,2	42,5	54,6

Как следует из табл. 4.3, из мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси были получены составы с прочностью при сжатии через 3 суток твердения 50,2 – 54,6 МПа.

В рамках экспериментальных исследований определялась также усадка разработанной самоуплотняющейся бетонной смеси, т.к. этот показатель в сильной степени прочность и надежность штепсельного соединения. Для этого ненагруженный образец стыка из разработанной смеси диаметром 45 мм и высотой 200 мм, твердевший при температуре 40 °С в течение 2-х

суток, был извлечен из скважины штепсельного стыка и установлен в устройство по определению усадки согласно ГОСТ 24544-81. Схема испытания представлена на рисунке 2.5. Для определения показателя усадки применялся индикатор ИЧ с точностью измерения до 0,01 мм.



Рис. 4.12. Устройство для определения усадки бетона

В естественных условиях основными видами усадки являются аутогенная и усадка от высыхания [70, 71]. В таб. 4.4 представлены показатели усадки образца стыка из мелкозернистой самоуплотняющейся бетонной смеси.

Таблица 4.4

Изменение размеров образца с течением времени

Возраст бетона, суток	3	7	14	28	120
Высота образца, h, мм	200,79	200,78	200,75	200,74	200,74
Диаметр образца d, мм	45,12	45,11	45,11	45,10	45,10
Коэффициент усадки, %		0,05	0,06	0,11	0,11

Анализ результатов эксперимента (табл. 4.4) показывает, что разработанная смесь практически не меняется в объеме со временем, что положительно влияет на адгезионные к арматуре свойства состава. Коэффициент усадки не изменяется с достижения бетоном проектного возраста, поэтому можно предположить отсутствие временной усадки от высыхания. Коэффициент аутогенной усадки исследуемого образца составил

0,11% на 28 суток твердения. Учитывая тот факт, что предлагаемый состав изготавливается на алитовом цементе, можно сделать вывод о возможности его применения в условиях термообработки штепсельных стыков железобетонных конструкций без возникновения опасений возникновения усадочных деформаций.

Выполнены исследования по оценке способности самоуплотняющейся смеси защищать от коррозии стальную арматуру. Для этого на очищенные пескоструйной обработкой поверхности стальных пластинок толщиной 0,5 мм и площадью 100×100 мм наносился слой самоуплотняющейся смеси толщиной 3 мм. Для испытания применялся состав с суперпластификатором Glenium-SKY[®] 505 и контрольный состав цементно-песчаной смеси без модификатора. Образцы пластинки с покрытиями хранились в условиях лаборатории в эксикаторах над водой в течение 4 лет. Через каждые 150 суток пластинки осматривались на предмет присутствия следов ржавчины. Последняя оценка производилась через 4 года после нанесения составов.

На рис. 4.13 (а, в) представлено покрытие составом без модификатора, где хорошо видны следы коррозии, что свидетельствует о низкой способности состава защищать арматуру от коррозии.

Через 150 суток на пластинке с модифицированным составом не было обнаружено признаков отслоения модифицированных составов и не зафиксировано следов коррозии стали (рисунок 4.13, б). Осмотр пластины с нанесенным модифицированным составом через четыре года показал высокую способность состава защищать стальную арматуру от коррозии (рисунок 4.13, г).

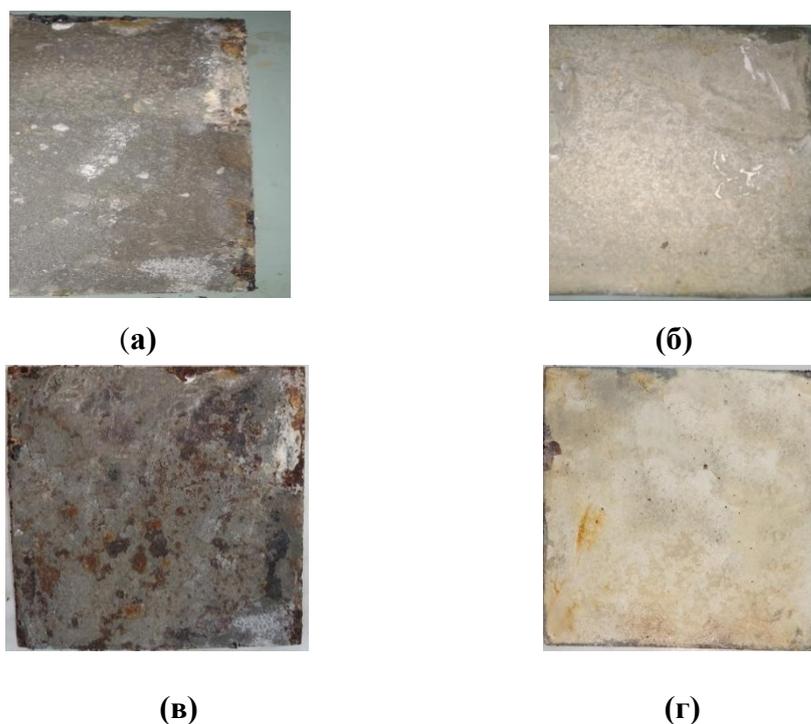


Рис.4.13. Состояние стальных пластинок с покрытием: а – без модификатора (через 150 дней); б – с модификатором Glenium® SKY 505 (через 150 дней); в – без модификатора (через 4 года); г – с модификатором Glenium® SKY 505 (через 4 года);

Производственное бетонирование стыков каркасных элементов показало высокое качество получаемого изделия при применении разработанной технологии. Были получены образцы с прочностными показателями до 60 МПа, что дает возможность применять полученную растворную смесь для заделки штепсельных стыков колонн и железобетонных конструкций проектных классов до В40 [147].

4.3. Исследование качества и характеристик механической прочности штепсельного соединения

Вполне очевидно, что характеристики и показатели механической прочности бетонной смеси, предназначенной для укладки в штепсельные стыки, имеют решающее значение при получении прочных и надежных штепсельных соединений. В настоящее время единственным способом

получения достоверных сведений о таких показателях и характеристиках является проведение экспериментальных исследований.

При выполнении экспериментов была использована бетонная смесь, состав которой представлен в разд. 4.2: в качестве вяжущего применен портландцемент ЦЕМ I 52,5 (ГОСТ 31108-2003) с удельной поверхностью $360 \text{ м}^2/\text{кг}$. В качестве наполнителя применялся кварцевый песок $M_{кр}=1,2$ и мелкодисперсный кварцевый песок удельной поверхностью $100 \text{ см}^2/\text{г}$. Состав заливался в скважину штепсельного стыка и твердел при температуре $+40\pm 2^\circ\text{C}$ в штепсельном стыке колонны по схеме $2+68+2$ ч в течение 3 суток. Затем образец извлекался, распиливался на образцы-цилиндры диаметром 40 мм и высотой 40 мм, которые помещались в камеру нормального твердения КНТ-60.

Самоуплотняющиеся составы с растекаемостью смесей в конусе Хегерманна 247–270 мм. были получены при содержании суперпластификатора в количестве 1,5 % от массы цемента. Водотвердое отношение при использовании суперпластификатора Glenium ACE 430 составило 0,136-0,169. Составы модифицированного мелкозернистого бетона, использованного для исследования характеристик его механической прочности испытанием на гидравлическом прессе, приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Составы модифицированного мелкозернистого бетона

№ п/п	Состав сухой смеси, кг			В/Т	Содержание Glenium® ACE 430 % от массы цемента	Распływ в конусе Хагермана, мм.	Предел прочности при сжатии, МПа, 3 сутки	Предел прочности при сжатии, МПа, 7сутки
	Цемент	Песок, $M_{кр}=1,2$	Наполнитель, песок, уд. поверхность $100 \text{ см}^2/\text{г}$.					
1	900	600	300	0,150	1,5	262	36,1	37,5
2	900	450	450	0,169	1,5	270	31,0	32,5
3	900	750	150	0,147	1,5	255	37,3	37,6
4	750	600	300	0,139	1,5	250	30,2	31
5	750	450	450	0,146	1,5	256	27,3	28,8
6	750	750	150	0,136	1,5	248	32,4	33,3
7	600	600	300	0,140	1,5	245	25,8	26,4
8	600	450	450	0,146	1,5	250	22,1	23,4
9	600	750	150	0,134	1,5	247	27,0	27,8

В результате обработки результатов экспериментов методами факторного анализа получены математические модели зависимости прочности бетона Y_1, Y_3, Y_{28} соответственно на, 3-и, 28-е сутки – при использовании тепловой обработки и 28-е сутки при нормальных условиях твердения от соотношения компонентов самоуплотняющейся смеси – X_1 и содержания цемента - X_2 . При доверительной вероятности 95 % модели имеют вид:

$$Y_3 = 3,4 - 2,0 X_1 + 0,8 X_2 - 0,8 X_1^2 - 0,4 X_1 X_2; \quad (4.1)$$

$$Y_{28} = 21,6 - 1,6 X_1 + 1,9 X_2; \quad (4.2)$$

$$Y_{28H} = 35,1 + 1,3 X_1 + 3,2 X_2. \quad (4.3)$$

Таблица 4.6

Уровни варьирования переменных факторов

№ п/п	Наименование переменных факторов	Уровни варьирования факторов		
		-1	0	+1
1	X_1 - соотношение компонентов мелкий наполнитель / кварцевый песок	1/5	1/2	1/1
2	X_2 - содержание цемента	600	750	900

Графическое представление моделей (4.1) ÷ (4.3) приведено на рис. 4.14÷4.16. Анализ полученных результатов (рис. 4.14÷4.16) показывает, что увеличение доли мелкодисперсного наполнителя в бетонной смеси снижает прочность бетона в возрасте 28 суток до 20 %. Со снижением количества цемента в смеси влияние мелкодисперсного наполнителя на прочность менее заметно. Применение тепловой обработки при $+40 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 3 суток значительно повышает прочность бетона, но при этом набор конечной 28 суточной прочности бетона замедляется до 17-22 % в сравнении с образцами, твердеющими изначально в нормальных условиях.

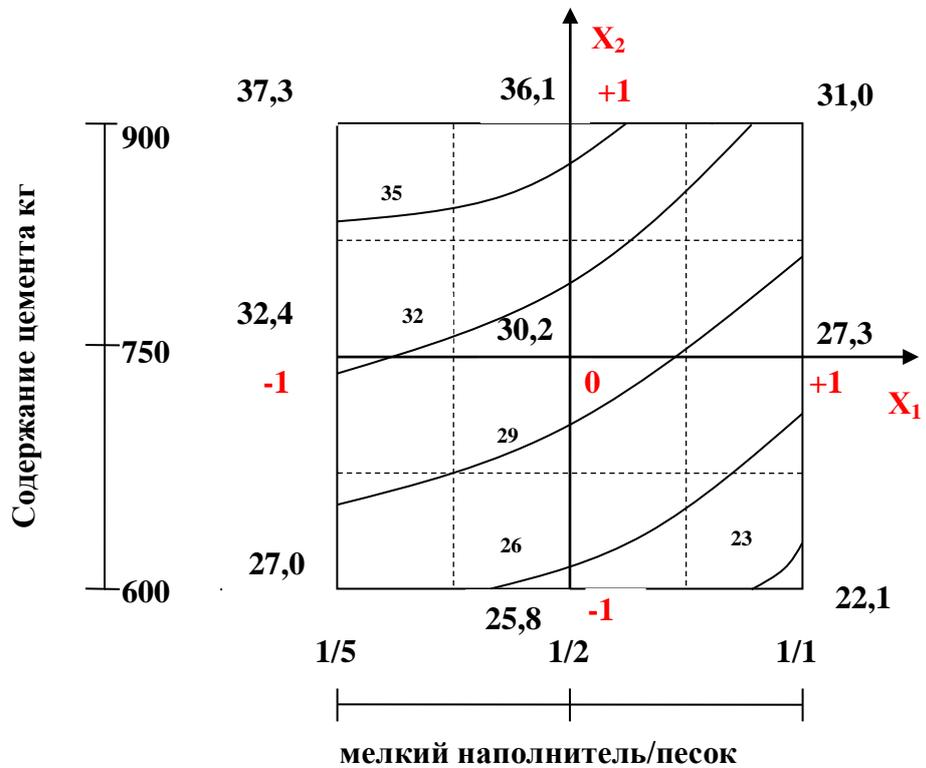


Рис. 4.14. Диаграмма прочности при сжатии бетона, МПа через 3 суток твердения при обогреве $40\pm 2^\circ\text{C}$ в координатах: X_1 - соотношение компонентов мелкий наполнитель/песок, % Ц; X_2 – содержание цемента

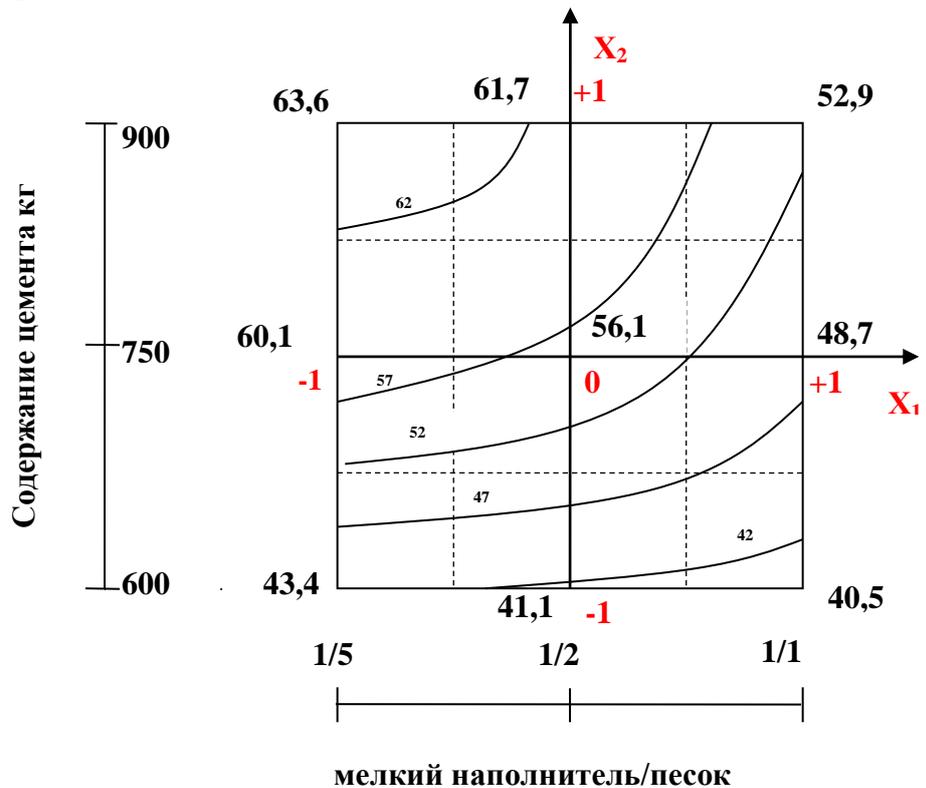


Рис. 4.15. Диаграмма прочности при сжатии бетона, МПа через 28 суток твердения при обогреве в течении 3 суток при $40\pm 2^\circ\text{C}$ в координатах: X_1 - соотношение компонентов мелкий наполнитель/песок, % Ц; X_2 – содержание цемента

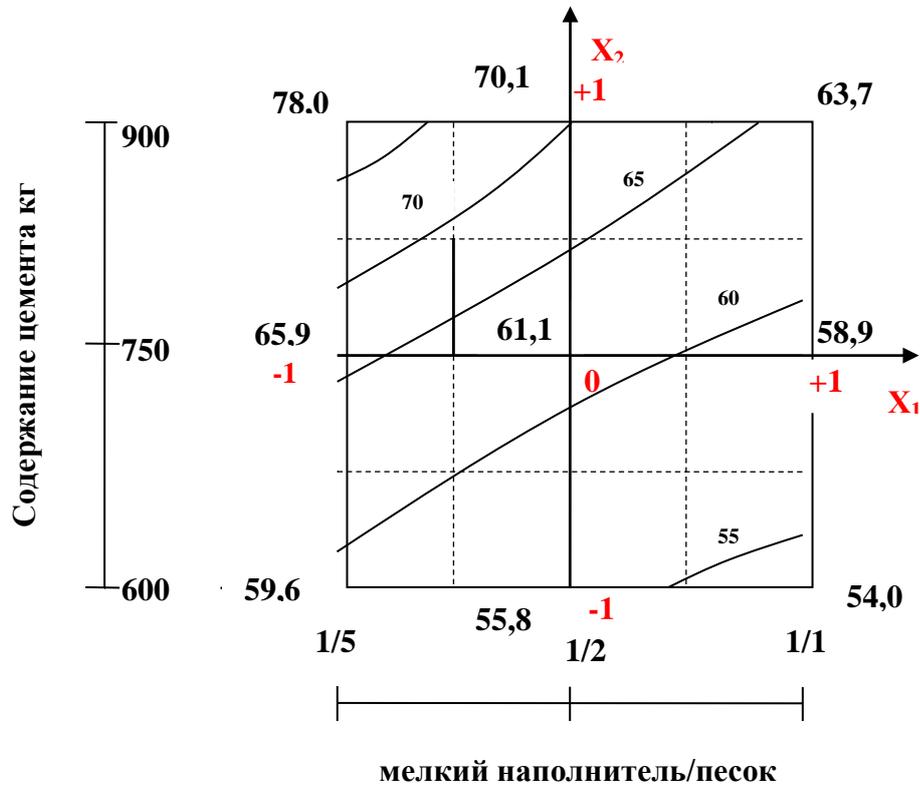


Рис. 4.16. Диаграмма прочности при сжатии бетона, МПа через 28 суток твердения в нормальных условиях в координатах: X_1 - соотношение компонентов мелкий наполнитель/песок, % Ц; X_2 – содержание цемента

Исследования показали, что полученные составы самоуплотняющихся смесей обладают повышенной текучестью, выражаемой в способности свободно проникать в отверстия диаметром от 10 мм. Испытание образцов цилиндров размером 40×40×40 мм – на третьи сутки твердения показали, что их прочность при сжатии соответствует более 70% проектной прочности класса В30 (при стандартном коэффициенте вариации 13,5 %) для составов с содержанием цемента 900 и 750 кг.

При дальнейшем хранении образцы продолжают набирать прочность. В возрасте 7 суток прирост прочности составов составляет от 0,5 до 1,4 % от 3-х суток твердения. Полученные результаты объясняются показателем водоцементного отношения, определяющего формирование плотности исследуемых составов и его влияния на формирование предела прочности при сжатии.

Исследована средняя плотность составов 1,2,3 (таб. 4.5) с помощью гидростатического взвешивания. Установлено, что увеличение соотношения кварцевый песок / мелкий наполнитель 1/0,2, 1/0,5 и 1/1, снижает плотность 2,45 кг/м³, 2,36 кг/м³ и 2,26 кг/м³ соответственно, что подтверждается показателем водотвердого отношения, однако растекаемость при этом увеличивается.

По результатам выполненных исследований сделан вывод, что для практического применения при получении штепсельных соединений следует рекомендовать составы 1,2,3 (табл. 4.5), имеющие лучшие показатели растекаемости (табл. 4.5) и прочности при сжатии (4.1)÷(4.3).

Недостатком представленных результатов экспериментальных исследований (табл. 4.5 и рис. 4.14÷4.16) является то, что они получены только при одном значении температуры изотермической выдержки (+40±2°C). Однако, как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований характеристик температурного поля (разд. 3.1 и 4.1) в ходе электротепловой обработки наблюдается достаточно неравномерное распределение температуры по длине штепсельного стыка, т.е. возникают неодинаковые температурные условия твердения свежей бетонной смеси, уложенной в штепсельный стык. Поэтому были выполнены экспериментальные исследования кинетики роста предела прочности при сжатии такого бетона при различных значениях температуры изотермической выдержки.

Для исследования влияния температуры изотермической выдержки на предел прочности при сжатии бетонной смеси в штепсельном стыке, из самоуплотняющихся бетонных смесей при наличии и при отсутствии суперпластификатора Glenium® 51 методом литья формовались образцы - кубы с ребром 70 и 20 мм. Образцы в течение первых 3-х суток выдерживались при температуре 30 и 40 °C, после чего твердение образцов происходило при температуре +20±2 °C и относительной влажности воздуха 95±5 %. Кроме этого, были изготовлены образцы, твердение которых

происходило только при температуре $+20 \pm 2$ °С. Кинетика роста их прочности в зависимости от условий твердения и наличия добавки представлена на рис. 4.17.

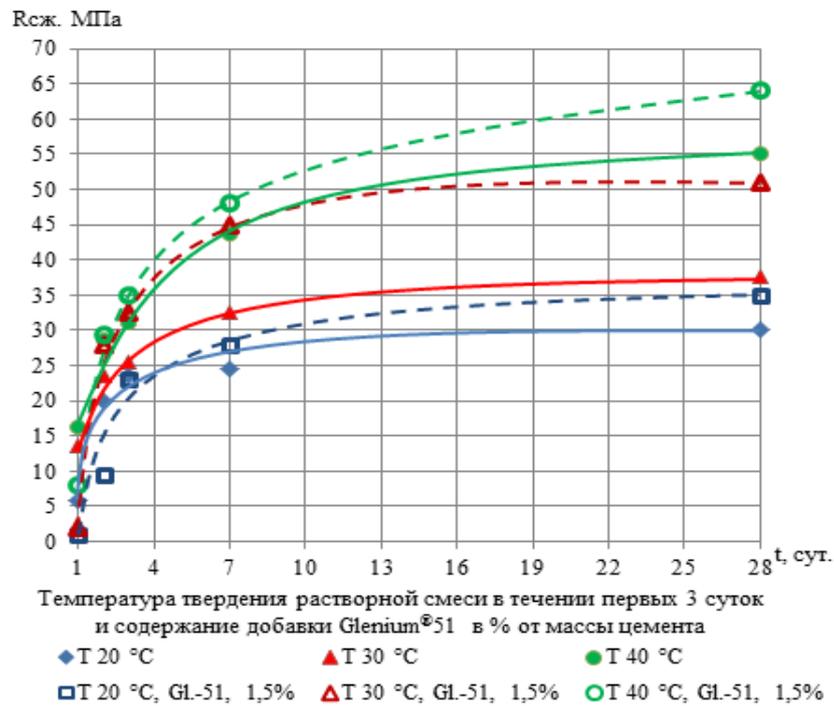


Рис. 4.17. Прочность самоуплотняющейся бетонной смеси наливного типа в зависимости от содержания суперпластификатора Glenium® 51 и температуры твердения в течение первых 3 суток.

Анализ результатов исследований, приведенных на рис. 4.17, показал, что введение суперпластификатора Glenium® 51 в количестве 1,5 % от массы цемента сдерживает рост прочности самоуплотняющегося бетона в первые сутки твердения при $+20 \pm 2$ °С в 5 раз. Но в возрасте 28 суток самоуплотняющийся бетон приобретает на 47 % более высокую прочность. Увеличение температуры изотермической выдержки в первые трое суток с $+20 \pm 2$ до $+30 \div 40 \pm 2$ °С способствует интенсификации твердения бетона на ранней стадии до 13–27 %, что необходимо для обеспечения высоких темпов строительных работ. Применение температуры изотермической выдержки 40 ± 2 °С в течение 2 суток самоуплотняющейся бетонной смеси позволяет получить прочность не ниже 50 % в сравнении 28-суточной. Анализ зависимостей рис. 4.16 позволяет также сделать вывод о том, что полученные

результаты (рис. 4.17) подтверждают опасения по поводу неблагоприятных последствий неравномерного распределения температуры по длине штепсельного стыка в процессе электротепловой обработки штепсельного соединения (разд. 3.1 и 4.1). Действительно, при различии температуры между ее значением в середине стыка и по его краям в 33 % от температуры изотермической выдержки 40 °С (в середине стыка) согласно рис. 3.6 и 4.5 различие в величине предела прочности при сжатии бетона, уложенного в стык, в возрасте 28 суток может достигать 36 % (рис. 4.17). Это подтверждает сделанные ранее выводы (гл. 3, разд. 4.1) о целесообразности, в дальнейшем, совершенствования методики электротепловой обработки штепсельного соединения в целях достижения более равномерного распределения температуры по длине штепсельного стыка.

Высокие показатели предела прочности при сжатии после затвердевания образцов предложенного состава (табл. 4.5) еще не дают полной гарантии, что изготовленные с их применением штепсельные стыки будут иметь необходимую механическую прочность. Сомнения на этот счет можно устранить только посредством экспериментальных исследований.

Для опытного определения механической прочности стыка был применен состав 1 (табл. 4.5), имеющий наилучшие показатели механической прочности и растекаемости, а также других параметров (разд. 4.3).

В эксперименте применялась арматура марки 25Г2С диаметрами 12 и 16 мм; металлическая труба для скважины внешним и внутренним диаметром 45 и 36 мм соответственно. Такая арматура широко применяется в настоящее время в конструкции железобетонных колонн, предназначенных для сборно-монолитного строительства. Пространство между арматурой и трубой заполнялось свежей бетонной смесью. Твердение происходило в теле колонны при температуре 40 °С в течении 3–х суток. Затем образцы извлекались и испытывались растяжением (т.е. наиболее опасным для штепсельного стыка воздействием) на разрывной машине ИР 5058.

Поскольку испытать штепсельный стык в натуральную длину технически невозможно, для экспериментов было изготовлено несколько образцов меньшей и различной длины, как представлено на рис. 4.18.



Рис. 4.18. Образцы-модели штепсельного стыка для определения механической прочности

В ходе испытаний стыка длиной 26 см (рис. 4.19) произошел разрыв арматуры диаметром 12 мм при нагрузке 7,18 т. График изменения нагрузки в процессе испытания представлен на рис. 4.20.

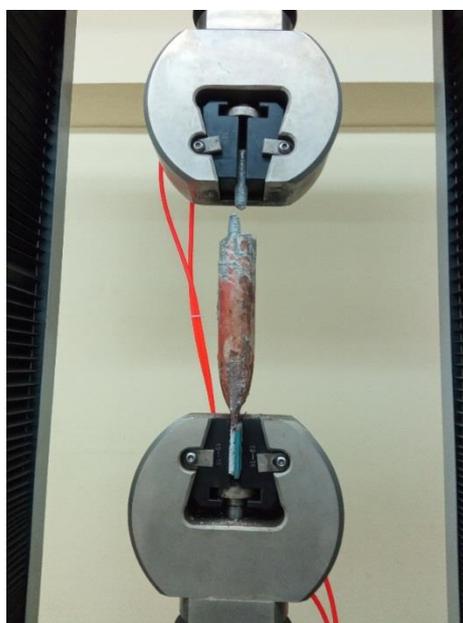


Рис. 4.19. Разрыв арматуры при испытании модели штепсельного стыка

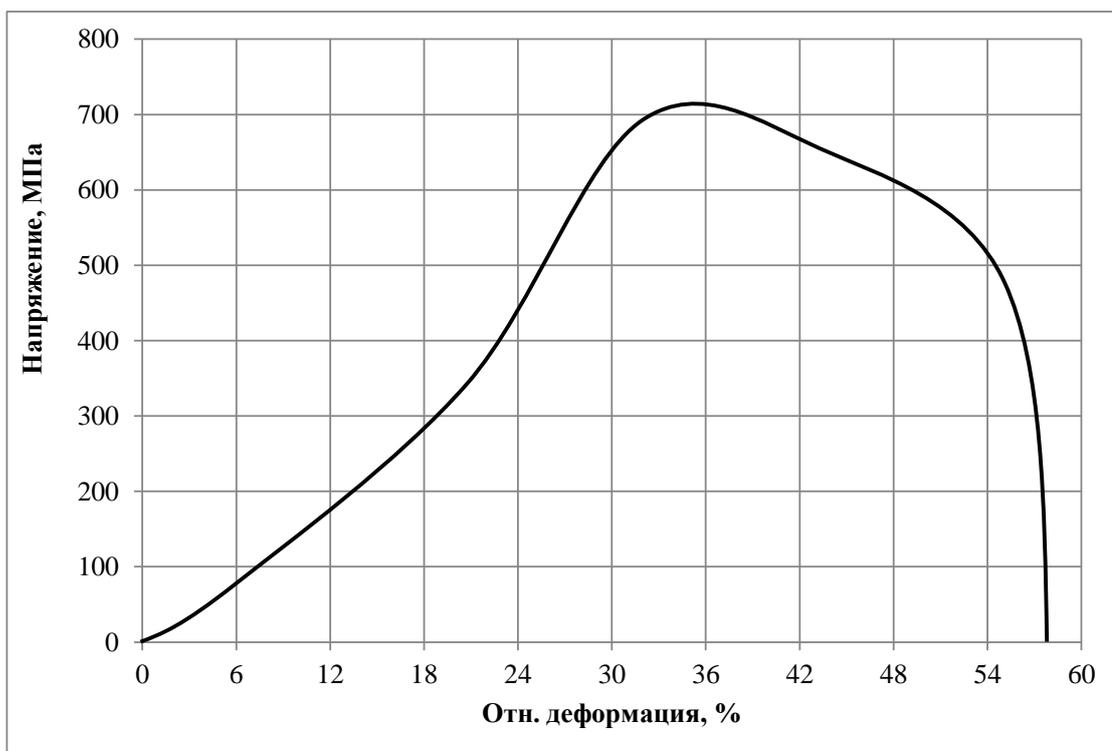


Рис. 4.20. График изменения нагрузки при испытании модели штепсельного стыка

При испытании стыка длиной 27,5 см с арматурой диаметром 16 мм произошел разрыв трубы (рис. 4.21) в месте крепления к коническому зажиму при нагрузке 14,6 т. График изменения нагрузки в этом испытании представлен на рис. 4.22.

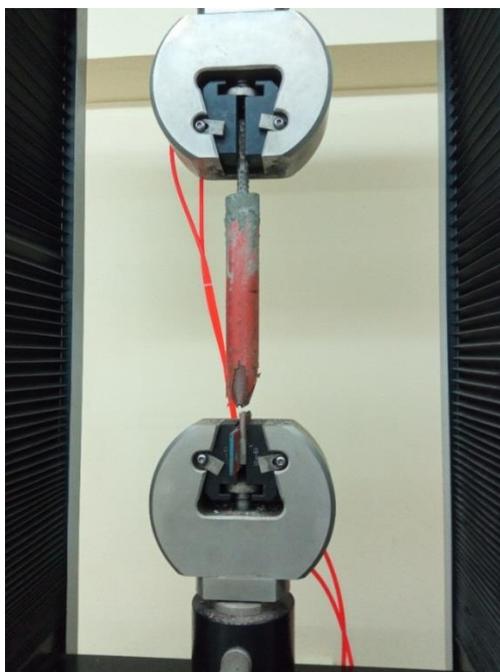


Рис. 4.21. Разрыв трубы при испытании модели штепсельного стыка

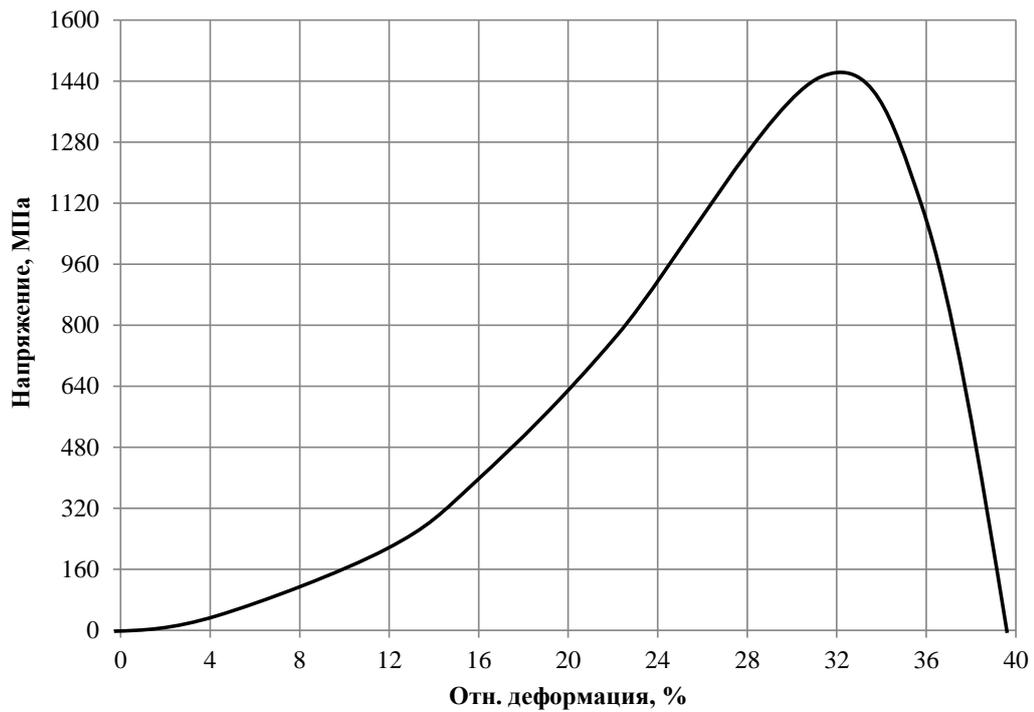
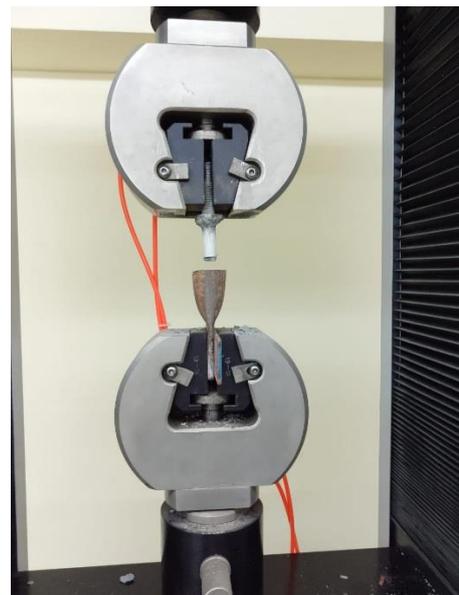


Рис. 4.22. График изменения нагрузки при испытании модели стыка в случае разрыва в трубе.

На рис. 4.23 представлено испытание образца длиной трубы 5 см с установкой в него арматуры диаметром 16 мм.



а)



б)

Рис. 4.23. Испытание модели штепсельного соединения длиной 5 см: а – в момент нарушения прочности; б – после выхода стержня из соединения

Образец разрушился при нагрузке 4,47 т. Как следует из рис. 4.23, Потеря сцепления произошла на границе поверхности арматуры (стержня), т.е. в месте контакта стержня с бетоном. Механически прочность сцепления стыка составила $4470 \text{ кг} / 31,8 = 140,56 \text{ кг/см}^2$. На рис. 4.24 показан график изменения нагрузки в ходе испытания на разрыв модели длиной 5 см.

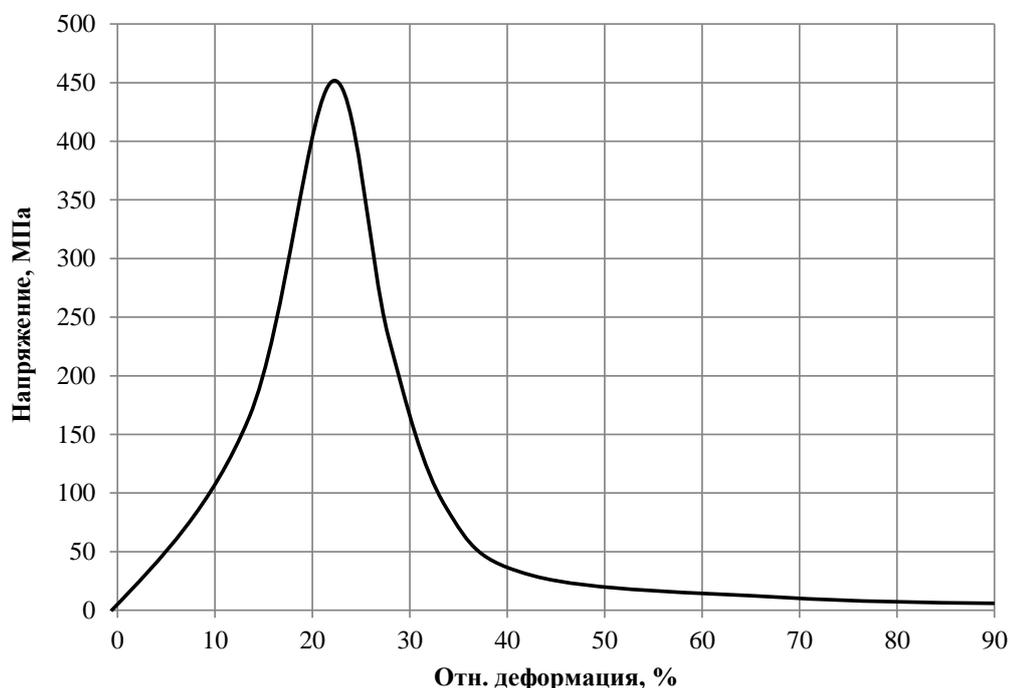


Рис. 4.24. График изменения нагрузки при растяжении модели стыка длиной 5 см

Результаты испытания моделей штепсельных стыков позволяют сделать вывод о высокой надежности и механической прочности таких стыков в реальных условиях. Действительно, уже при длине модели 26÷27,5 см механическая прочность бетона и его сцепления с арматурой оказалась выше прочности металлической арматуры (рис. 4.18, 4.20), входящей в состав конструкции железобетонной колонны. Вполне очевидно, что в реальных условиях, когда длина штепсельного стыка составляет 70 см, возможность его разрушения полностью исключается.

4.4. Выводы по главе 4

1. Эксперимент, выполненный с помощью специально разработанной и изготовленной лабораторной установки, содержащий макет штепсельного соединения железобетонных колонн сечением 300x300 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. Установлено, что фактический зазор между поверхностью нагревателя и поверхностью бетона $H_g = 0,45$ мм практически на порядок превышает значение $H_g = 0,05$ мм, определяемое нормативными документами, однако это обстоятельство не влечет за собой каких-либо нежелательных последствий т.к. небольшое снижение скорости роста температуры в месте расположения стыка в начальный период ЭТО не должно оказать существенное влияние 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.
3. Ситуация с воздушным зазором, отмеченная в предыдущем пункте, требует, в одной стороны, более серьезного отношения к подготовке бетонной поверхности железобетонных колонн перед установкой на нее поверхностного нагревателя, в другой, дополнительного изучения этого вопроса: возможных на практике вариантов профилей поверхности бетона и нагревателей, наличие и характер их плотного контактирования, распределение температуры и градиентов

температуры вдоль профиля поверхности, оценка практического значения этого распределения, величины и опасности градиентов температуры в местах плотного контакта и т.д.

4. Результаты эксперимента и расчета применительно к лабораторному макету штепсельного соединения указывают на заметные отличия характеристик температурного поля макета и реальной конструкции; поэтому при физическом моделировании процессов ЭТО в лабораторных условиях опытные макеты должны по своим характеристикам и конструктивным параметрам соответствовать реальным строительным конструкциям, для которых применяется это моделирование.
5. Предложенная в настоящей работе рецептура бетонной смеси для укладки в штепсельный стык при получении штепсельных соединений железобетонных колонн с применением ЭТО обеспечивает ей необходимый набор эксплуатационных качеств: высокая механическая прочность после затвердевания при температурах ЭТО, хорошая удобоукладываемость, малая усадка при твердении, приемлемые значения времени схватывания, достаточно быстрый рост механической прочности во времени после укладки и др.
6. Высокие показатели механической прочности предложенной бетонной смеси после затвердевания и моделей штепсельного соединения с ее применением, полученные в работы, не оставляют сомнений в высокой механической прочности и эксплуатационной надежности штепсельных соединений, изготовленных с помощью ЭТО и предложенной бетонной смеси, укладываемой в штепсельный стык при монтаже сборно-монолитных конструкций.
7. Результаты исследования влияния различных факторов на величину предела прочности на сжатие бетона, предназначенного для укладки в штепсельный стык, подтвердили опасения о негативном влиянии неравномерного распределения температуры по длине штепсельного

стыка, высказанные по результатам теоретических (гл. 3) и экспериментальных исследований (разд. 4.1) характеристик температурного поля в штепсельном соединении в ходе его электротепловой обработки; например, вследствие различия температуры в середине (по длине) стыка и по его краям различие в значении предела прочности бетона, уложенного в стык, в этих местах в возрасте 28 суток может достигать 36 %; целесообразно продолжить, в дальнейшем, исследование влияние этого фактора, а также разработки по совершенствованию процесса электротепловой обработки с помощью предложенных в настоящей работе расчетных методик в целях достижения более равномерного распределения температуры по длине штепсельного стыка.

ГЛАВА 5. Применение электротермической обработки при получении штепсельного соединения железобетонных колонн в полевых производственных условиях

Любые лабораторные исследования не в состоянии дать окончательный ответ относительно возможности применения новых технологических процессов или устройств на практике. Такой ответ может быть получен только в результате производственных (полевых) испытаний. Это утверждение справедливо и в отношении процесса электротепловой обработки штепсельных соединений железобетонных колонн с помощью поверхностного электропрогрева при монтаже сборно-монолитных конструкций. В настоящей главе представлены результаты исследований и разработок такого процесса применительно к производственным условиям.

5.1. Разработка технологии укладки бетонной смеси в обратные (двойные) штепсельные соединения в полевых условиях.

Особенностью технологии укладки смеси в обратные стыки являются предельно малые отверстия заполнения. Заливное отверстие выполняется, как правило, диаметром 20 мм. Расстояние между арматурой и стенкой скважины находится в пределах 10-20 мм. Поэтому при использовании цементно-песчаных смесей возникает необходимость инъектирования составов под большим давлением. Такая технология требует наличия специального оборудования, в том числе механического смесителя для приготовления инъекционных растворов, конструкции опалубочных рамок, используемых при замоноличивании контактных стыков, поршневого насоса, механического шприца с электрическим приводом и т.д. Данный способ

замоноличивания в обратные стыки может привести к заземлению воздуха, вследствие низкой подвижности смеси или отсутствия компрессионных зазоров. При увеличении давления подачи раствора возможно выдавливание опалубки, закрывающей горизонтальный стык колонн.

В целях совершенствования процесса замоноличивания обратных стыков штепсельных соединений предлагается применять мелкозернистую самоуплотняющуюся смесь наливного типа, рецептура и характеристики которой рассмотрены в гл. 4. Особенность данной смеси состоит в повышенной текучести состава, который не требует применения насоса, и имеет возможность проходить через предельно малые отверстия диаметром $4\div 10$ мм.

Перед укладкой цементно-песчаного раствора (гл. 4) на верхнем торце нижестоящего элемента колонны устанавливается стальная сборная опалубочная рамка с плотным примыканием по периметру колонны. Рамку следует устанавливать таким образом, чтобы она выступала над торцом элемента на величину, превышающую на 10-20 мм толщину шва. Внутренние стенки выступающей части рамки должны иметь скос для облегчения установки вышестоящего элемента и выдавливания раствора при монтаже

Цементно-песчаный раствор следует укладывать равномерным слоем толщиной на 5-10 мм, превышающей толщину бетонного выступа. Установку и выверку колонны следует производить сразу после укладки раствора, что позволяет использовать его подвижность для обеспечения плотного контакта торцов стыкуемых элементов.

При заполнении шва посредством инъецирования растворной смесью опалубочную рамку устанавливают таким образом, чтобы она перекрывала шов между элементами с герметизацией резиновыми или поролоновыми прокладками по периметру колонны. Необходимости устройства зазоров в стенках опалубочной рамки нет, потому что воздух свободно выходит через литую смесь к месту (отверстию) заливки стыка.

Подачу инъекционного раствора в стык можно осуществлять

механическим шприцом с вертикальным поршнем. Основное условие – внутренний диаметр наконечника шприца не должен быть менее 4 мм.

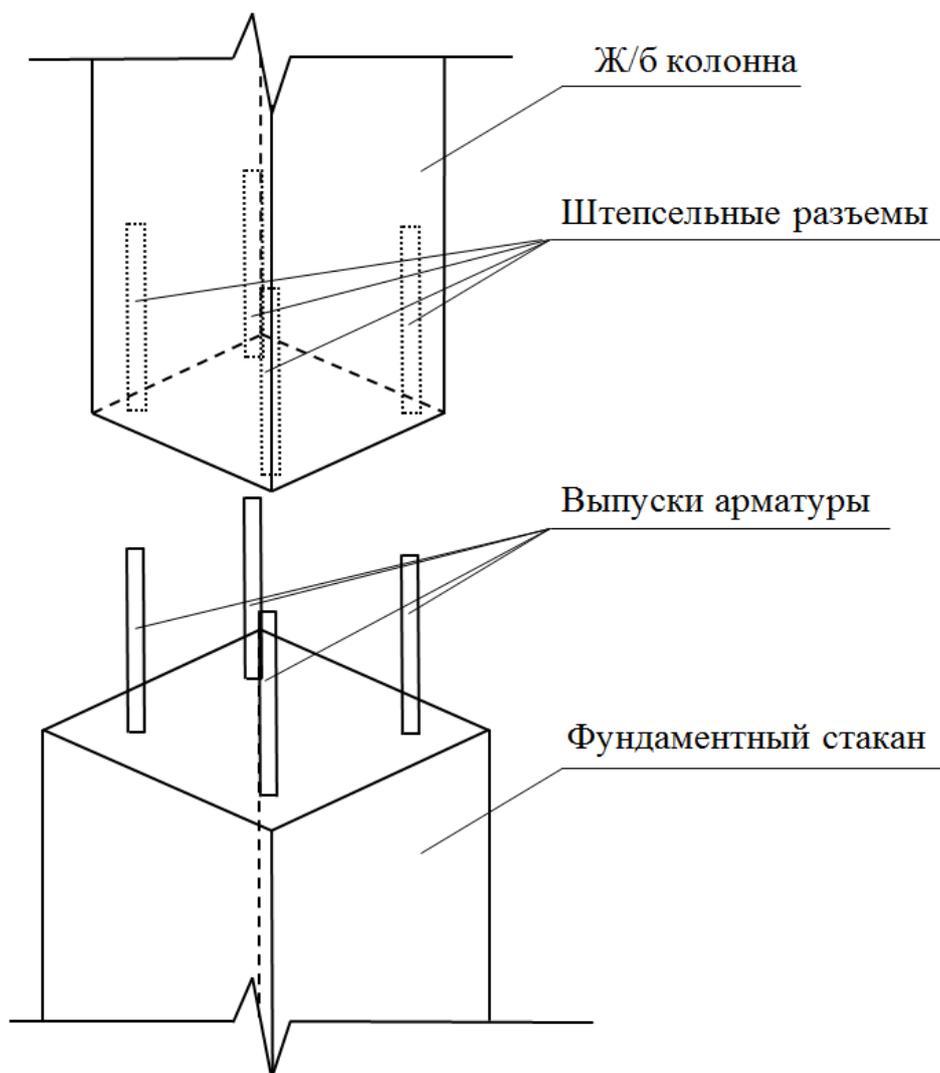


Рис. 5.1. Схема обратного штепсельного стыка соединения фундаментного стакана с выпуском арматуры и ж/б колонны со скважиной.

Во избежание загустевания раствор в емкости необходимо периодически перемешивать и соблюдать следующие условия:

- к замоноличиванию должно быть подготовлено не менее 6 стыков, либо всех стыков одной колонны. Их заполнение следует производить поочередно с минимальными перерывами;

- при работе с одним стыком следует обеспечить непрерывную подачу раствора;

- по мере заполнения шва инъекционным раствором контролировать протечки в горизонтальных стыках колонн;

- по окончании работ по замоноличиванию все инструменты необходимо тщательно промыть водой.

По завершении замоноличивания стыков колонн на их поверхность в области штепсельного соединения последовательно устанавливаются нагреватели и теплоизоляция, а затем начинается процесс электротепловой обработки.

Рекомендуется также предварительный обогрев стыкуемых элементов колонны до начала бетонирования с помощью различных обогревающих устройств. Укладку раствора следует производить только после достижения в полости стыка температуры не ниже 5 °С. Контроль за температурой обогрева осуществляется с помощью установленных в полость стыка термопар или технических термометров. Особое внимание следует уделять утеплению емкостей с раствором. Электротепловую обработку штепсельного стыка рекомендуется производить при скорости подъема температуры $v \leq 30$ °С/ч (гл. 3). Максимальная температура и продолжительность электропрогрева зависят от вида цемента и назначаются строительной лабораторией. Контроль за производством работ по электрообогреву раствора при замоноличивании следует вести непрерывно.

5.2. Разработка оборудования, оснастки для поверхностного электрообогрева и режимов электротермической обработки при получении штепсельных соединений в производственных условиях.

В строительстве широко используются методы прогрева бетона в зимнее время. Однако на сегодняшний день этот процесс требует ощутимых материальных затрат, связанных с большим количеством потребляемой энергии установок, большой трудоемкостью подготовительных стадий прогрева, обеспечением безопасности, а также возможным недобором

прочности обогреваемого бетона, уложенного в штепсельный стык, что приводит к необходимости демонтажа конструкции [7, 8, 9, 25, 26, 27].

Способ обработки бетона в термоактивной опалубке, т.е. с помощью поверхностного электропрогрева, отличается простотой и технологической надежностью. Однако эксплуатационные параметры традиционных термоактивных опалубок характеризуются высокими энергозатратами.

Технической задачей является снижение энергозатрат, за счет увеличения теплоотдачи от поверхности нагревателя, равномерного распределение тепла по поверхности нагревателя, обеспечения рационального обогрева бетона, учета экзотермии бетона, автоматизации процесса электротепловой обработки [95]. Эта техническая задача решается тем, что внутренний щит плоского нагревателя изготавливается из листа алюминиевого сплава Д-16, имеющего высокую теплопроводность. На поверхности листа фрезеруются канавки, в которые укладывается двойной нихромовый греющий провод в гибкой изоляции (см. рис. 5.2).

1-1

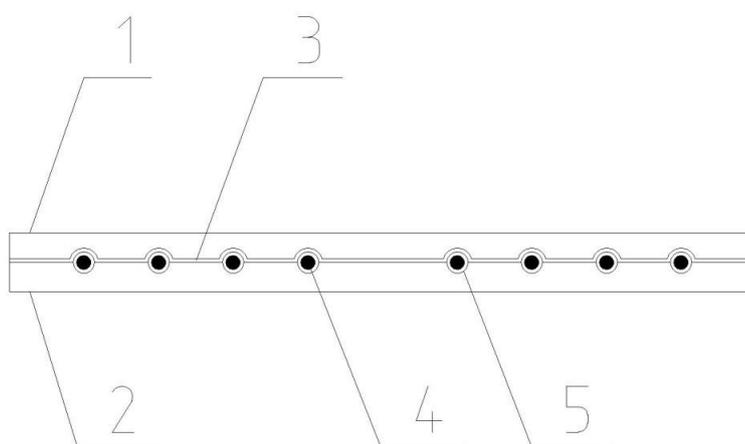


Рис. 5.2. Конструкция поверхностного электронагревателя в сечении перпендикулярном плоскости нагревателя: 1 – внутренний щит из алюминиевого сплава Д-16; 2 – внешний щит из плотного поликарбоната; 3 – теплопроводящий герметик; 4 – двойной нихромовый провод в гибкой изоляции; 5 – канавка для укладки двойного нихромового греющего провода.

Наружный слой щита изготавливается из плотного поликарбоната. Также в щите устанавливается термодатчик, расположенный равноудаленно от греющего провода (см. рис. 5.3).

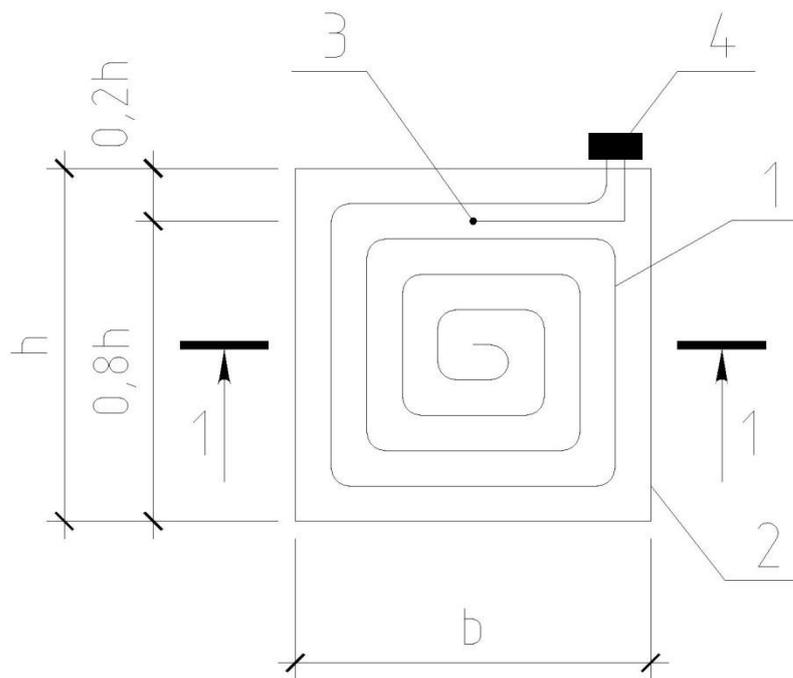


Рис.5.3. Конструкция электронагревателя нагревателя в сечении, параллельном его поверхности: 1 – двойной нихромовый провод; 2 – алюминиевый щит; 3 – датчик термодатчик; 4 – зажимная колодка для фиксации проводов

Управление электрической мощностью, подводимой к электронагревателям, производится с помощью контроллера, с возможностью корректировки и мониторинга процесса электротепловой обработки через компьютер [95].

Блок управления поверхностными электронагревателями состоит из контроллера, соединенного с компьютером через преобразователь интерфейса, блока питания, твердотельного реле с фазовым управлением по току, датчика аварии, датчика питания, реле вкл/выкл. питания сети (см. рис. 5.4).

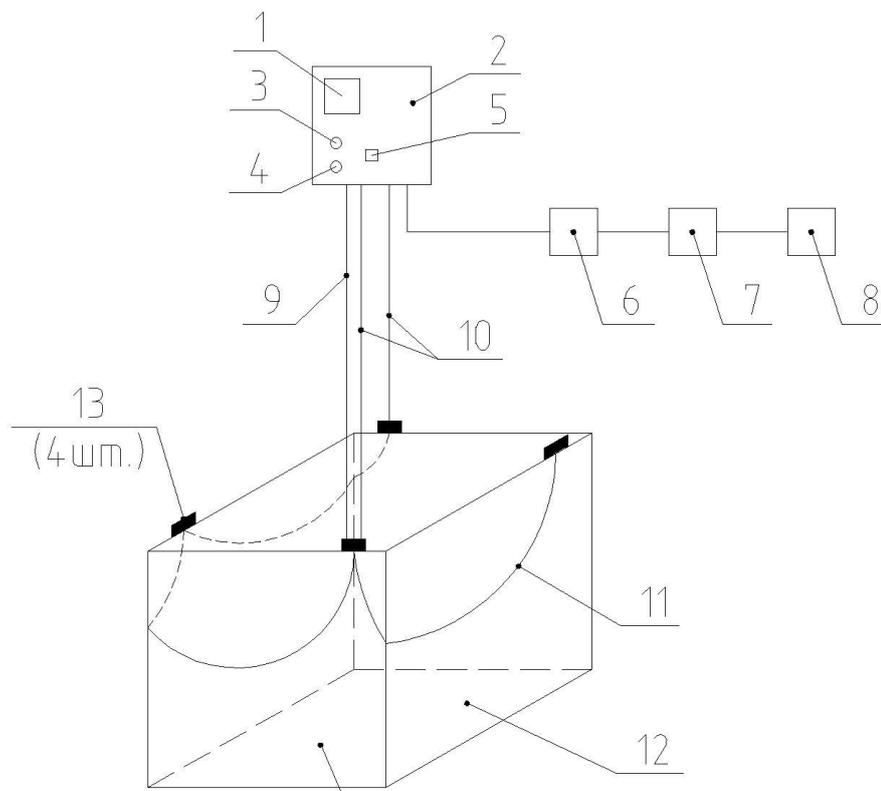


Рис. 5.4. Установка для электротепловой обработки штепсельного соединения железобетонных колонн: 1 – контроллер; 2 – блок управления; 3 – датчик аварии; 4 – датчик питания; 5 – реле вкл/выкл питания; 6 – преобразователь интерфейса; 7 – компьютер; 8 – выход в интернет; 9 – силовой кабель; 10 – термоэлектрический преобразователь; 11 – силовой кабель параллельного соединения щитов; 12 – плоский электронагреватель; 13 – зажимные колодки для фиксации проводов

В ручном (через контроллер) или в автоматическом (через компьютер) режиме пошагово задаются параметры (температура, скорость, время) электротепловой обработки штепсельного соединения. Контроллер посредством твердотельного реле плавно регулирует силу тока в нагревательном проводе плоского поверхностного электронагревателя. Контроллер ПИД регулирования процесса электрообогрева позволяет управлять изменением температуры в материале в зоне штепсельного соединения, что дает возможность эффективно использовать тепло экзотермии при гидратации свежего бетона, уложенного в штепсельные стыки, с возможностью сохранения постоянного значения заданной температуры посредством изменения электрической мощности, подводимой

к электронагревателям. Датчик аварии обеспечивает контроль безопасности технологического процесса. Мониторинг и корректировка процесса твердения бетона могут проводиться в режиме онлайн с выходом в Интернет.

Обязательным условием эффективного применения поверхностного электрообогрева является применение теплоизоляции, установленной поверх плоских электронагревателей (на рис. 5.4 – не показано), имеющую по высоте размер не менее высоты штепсельного стыка. Это позволяет существенно снизить бесполезные потери тепла вследствие его рассеяния в окружающую среду, ускорить процесс прогрева материала, улучшить характеристики температурного поля в его объеме, повысить КПД и технико-экономические показатели процесса электротепловой обработки [95].

Вполне очевидно, что весьма актуальной является задача минимизации энергопотребления при электротепловой обработке. Для этого должна быть определена минимальная продолжительность периода тепловой обработки, связанная с энергопотреблением. Основным критерием определения такого периода является достижение механической прочности бетона, уложенного в штепсельный стык на уровне 30-40 % проектной (нормированной) прочности, после которого процесс твердения при медленном остывании будет продолжаться независимо от внешнего теплового воздействия [15, 17, 87, 104, 105]. Дополнительные требования диктуются видом конструкции и условиями их эксплуатации [20, 21, 22, 23].

В целях определения эксплуатационных показателей процесса электротепловой обработки с помощью разработанной установки (рис. 5.4) были выполнены ее натурные испытания. Для такого испытания применялась, описанная выше (гл. 4), самоуплотняющаяся бетонная смесь следующего состава: портландцемент ЦЕМ I 42,5Б ОАО «Мордовцемент» – 350 кг/м³, песчано-гравийная смесь с содержанием песчаной фракции 50 % – 2000 кг/м³, поликарбоксилатный суперпластификатор фирмы BASF Glenium® 51 – 1,5 % от массы цемента, водоцементное отношение – 0,45. Бетонная смесь укладывалась в деревянную опалубку размером 400x400x400

мм с толщиной стенок 25 мм, на внутренней поверхности которой, обращенной к бетону, предварительно были установлены плоские электронагреватели. Измерение предела прочности при сжатии бетона определялась неразрушающим методом с помощью ультразвукового прибора УКС-МГ4. Температура в разных точках бетона использовалось устройство для определения теплофизических качеств бетона в натуральных условиях по температуропроводности бетона (патент РФ) [92]. В ходе испытаний контролировалась скорость изменения температуры в бетоне при изменении температуры окружающего воздуха, вида и режима прогрева. Выполнялся непрерывный температурный мониторинг исследуемого образца по всему объему в течение всего времени электротепловой обработки. Внешний вид установки во время испытаний показан на рис. 5.5.



Рис. 5.5. Внешний вид автоматизированной установки для электротепловой обработки железобетонных изделий с помощью поверхностного электропрогрева

Натурные испытания проводились при среднесуточной температуре окружающего воздуха $-20 \pm 5^\circ\text{C}$. Испытания показали, что при создании бетону температурных условий твердения в диапазоне $+(30 \div 40)^\circ\text{C}$ удельный расход электроэнергии в расчете на 1 м^3 бетона при использовании установки

электротепловой обработки с автоматическим программным управлением (рис. 5.5) колеблется в пределах $60 \div 80$ кВт-ч/м³. На рис. 5.6 отражена кинетика роста предела прочности при сжатии бетона при различном удельном расходе электроэнергии.

При удельном расходе электроэнергии 60 кВт-ч/м³ был обеспечен изотермический режим при $30 \pm 2^\circ\text{C}$. Соответственно, предел прочности бетона составил через сутки 9 МПа, через двое суток - $14,2$ МПа, через 3 суток - 21 МПа. Повышение удельного расхода электроэнергии на прогрев 1 м³ бетона с 60 до 80 кВт-ч/м³ позволило организовать изотермический обогрев при $40 \pm 2^\circ\text{C}$ (рис. 5.7). При этом, предел прочности бетона через сутки составил 11 МПа, через двое суток - $17,1$ МПа, через 3 суток - 25 МПа. Это означает, что повышение температуры изотермической выдержки с 30 до 40°C требует увеличения электроэнергии, подводимой к электронагревателям на 33% , и такое увеличение энергозатрат, по-видимому, вполне оправдано, так как позволяет сократить время набора бетоном равной прочности на 22% .

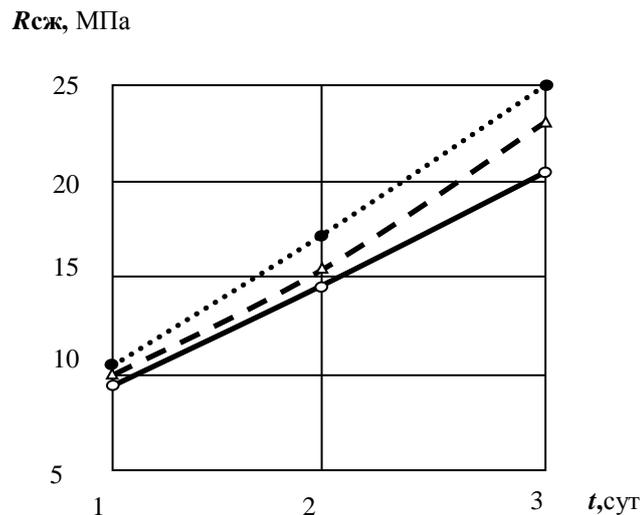


Рис.5.6. Зависимость предела прочности при сжатии бетона $R_{сж}$ от времени при различных значениях удельного расхода электроэнергии: \circ - 60 кВт-ч/м³; Δ - 66 кВт-ч/м³; \bullet - 80 кВт-ч/м³

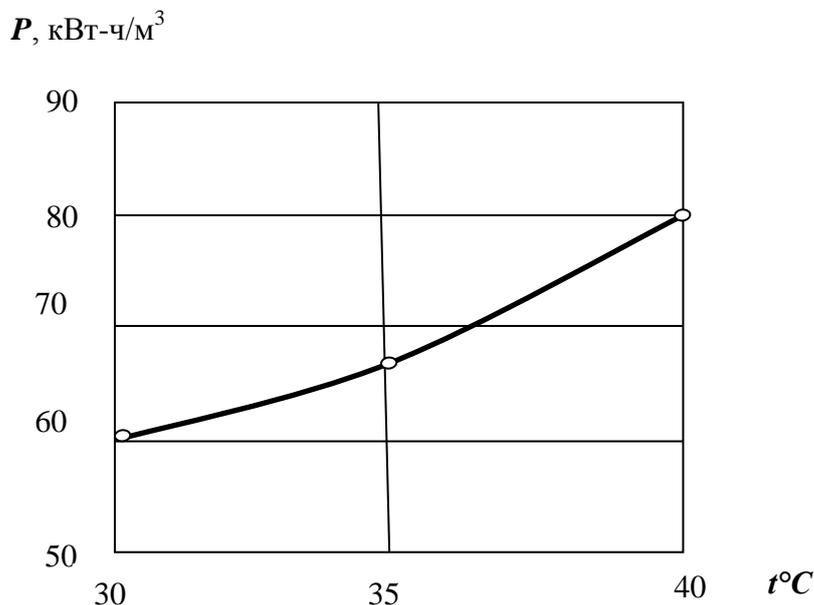


Рис.5.7. Связь между температурой изотермического обогрева t и удельным расходом электроэнергии P

Полученные результаты (рис. 5.6 и 5.7) могут быть использованы для минимизации энергопотребления в зависимости от проектных требований к бетону.

Как показали результаты измерения температуры, после достижения режима изотермической выдержки температура по сечению бетона 400x400 мм изменялась в пределах ± 2 °C, что свидетельствует о наличии весьма однородного температурного поля в объеме бетона, что полностью согласуется с результатами теоретических (гл. 3) и экспериментальных исследований (разд. 4.1).

5.3. Характеристики и показатели процесса электротепловой обработки при получении штепсельных соединений в производственных условиях.

Положительные результаты применения электротепловой обработки в условиях, близких к реальным, представленные в предыдущем разделе (разд. 5.2), явились основой для ее использования 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. В этих случаях была использована описанная выше самоуплотняющаяся бетонная смесь с модификатором на основе поликарбонатного эфира, предназначенная для заполнения штепсельных стыков сборно-монолитного железобетонного каркаса многоэтажного здания. Схема соединения представлена на рис. 5.1. Длина выпуска стержней арматуры – 80 мм. Диаметр продольной арматуры – 40 мм, зазор в штепсельном разьеме – 15 мм. Сечение фундаментного стакана 600х600 мм. Сечение колонны – 400х300 мм. Класс бетона конструкций – В25.

Заливка самоуплотняющейся бетонной смеси в штепсельные стыки производилась путем устройства технологических отверстий диаметром 10 мм в теле колонн в верхней части штепсельного разьема (рис.5.8). Бетонная смесь подавалась методом инъектирования через плунжерный шприц в технологические отверстия до полного заполнения.

Плоские нагреватели были установлены на две противоположные поверхности колонны шириной 400 мм на всю высоту штепсельного разьема (рис. 5.9). Поверх нагревателей и по всему периметру железобетонной колонны была установлена теплоизоляция (рис. 5.10). Затем производилась электротепловая обработка при температуре изотермической выдержки $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ по графику 0,5 ч. – 72 ч – 0,5 ч (рис.5.11). Начальная температура наружного воздуха составляла -18°C . Температура бетонной смеси составляла $+15^{\circ}\text{C}$. Во время проведения эксперимента температура воздуха колебалась в диапазоне $-17\pm 5^{\circ}\text{C}$.



Рис. 5.8. Технологические отверстия диаметром 10 мм для заливки самоуплотняющейся бетонной смеси в штепсельные стыки



Рис. 5.9. Установка плоских электронагревателей для электротепловой обработки штепсельного (шпунтового) соединения колонны и фундамента



Рис. 5.10. Наружная теплоизоляция штепсельного соединения колонны и фундамента.



Рис. 5.11. Внешний вид установки в ходе электротепловой обработки

Производственное бетонирование стыков каркасных элементов (рис. 5.8÷5.11) показало высокое качество получаемого изделия при применении разработанной технологии. Для проверки качества заполнения бетонной смесью полости штепсельного стыка, параллельно изготавливались идентичные по размеру модели соединений, состоящие из металлической трубы, с установленным стержнем арматуры. Через 28-суток после бетонирования и выдержки в температурных условиях, соответствующих условиям электротепловой обработки, металлическая труба разрезалась угловой шлифовальной машиной (рис. 5.12).



Рис. 5.12. Внешний вид разрезанной модели штепсельного стыка.

При осмотре внешнего вида поверхности бетонной смеси в месте примыкания к внутренней части металлической трубы (рис. 5.13) установлено отсутствие незаполненных участков, каверн и раковин, что свидетельствует об отсутствии воздушных пробок в штепсельном соединении и его полном заполнении.

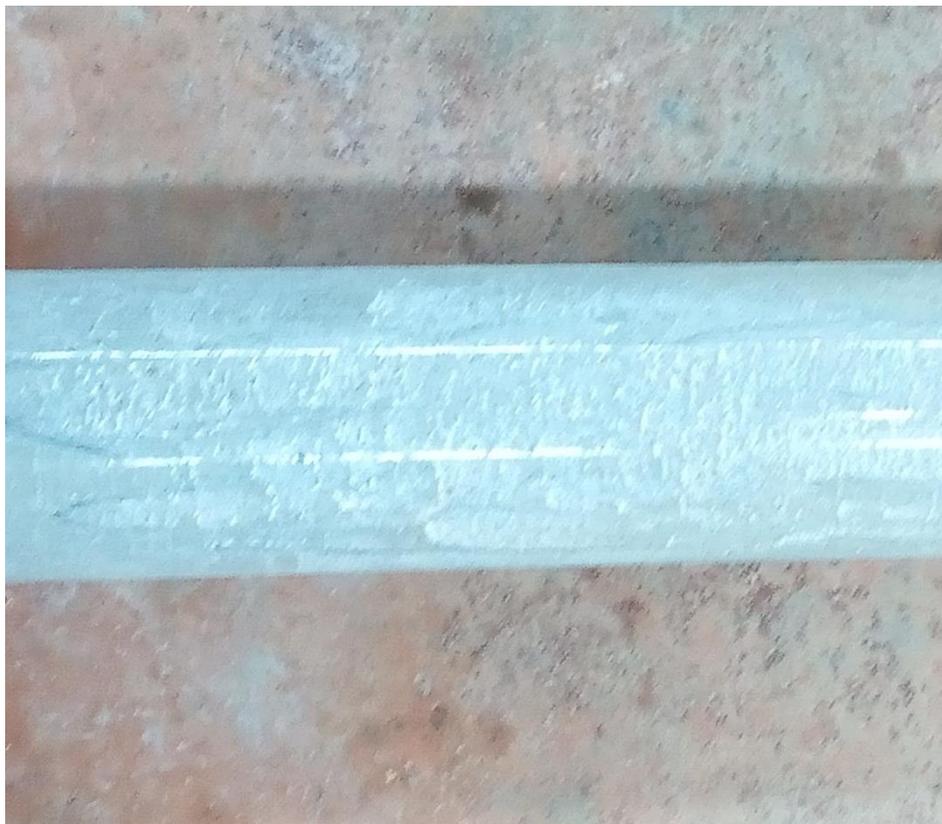


Рис. 5.13. Внешний вид контактной поверхности бетонной смеси.

Учитывая невозможность отбора залитых проб бетона из штепсельного отверстия колонны, предусмотрительно были изготовлены образцы из остатков применяемой мелкозернистой бетонной смеси. Результаты испытаний по определению предела прочности на сжатие образцов-кубов размером ребра 100 мм представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Физико-механические свойства самоуплотняющейся смеси

№ образца	Водотвердое отношение	Расплав смеси в конусе Хегерманна, мм	Предел прочности при сжатии, МПа			
			1 сутки	2 сутки	3 сутки	28 суток
1	0,113	226	22,3	41,2	50,2	61,1
2	0,112	226	24,3	42,5	54,6	63,2
3	0,116	232	20,3	39,2	48,3	57,6

Контрольные образцы, изготовленные из бетонной смеси, использованной для укладки в штепсельные стыки (рис. 5.8), твердение которых происходило при температурных условиях, соответствующих условиям электротепловой обработки (рис. 5.11), показали величину предела прочности при сжатии до 60 МПа. Это дает возможность применять

предложенную бетонную смесь для изготовления и ремонта с применением электротепловой обработки бетонных и железобетонных конструкций проектных классов до В40.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований характеристик температурных полей в объеме материала при электротепловой обработке (гл. 3,4), а также результаты применения электротепловой обработки штепсельных соединений в производственных условиях, представленные в настоящей главе убедительно доказывают актуальность сформулированной выше (разд. 1.5) задачи по созданию и применению автоматизированных систем дистанционного (через интернет) и качественного контроля температурных режимов электротепловой обработки штепсельных соединений, обработки поступающей информации и управления процессом такой обработки.

Данная техническая задача может быть решена с помощью использования устройства, которое признано изобретением, а решение достигается тем, что в обогреваемый бетон опускают термопарный кабель, сваренные концы которого располагают равноудалено (рис. 5.14, 5.15) [92].

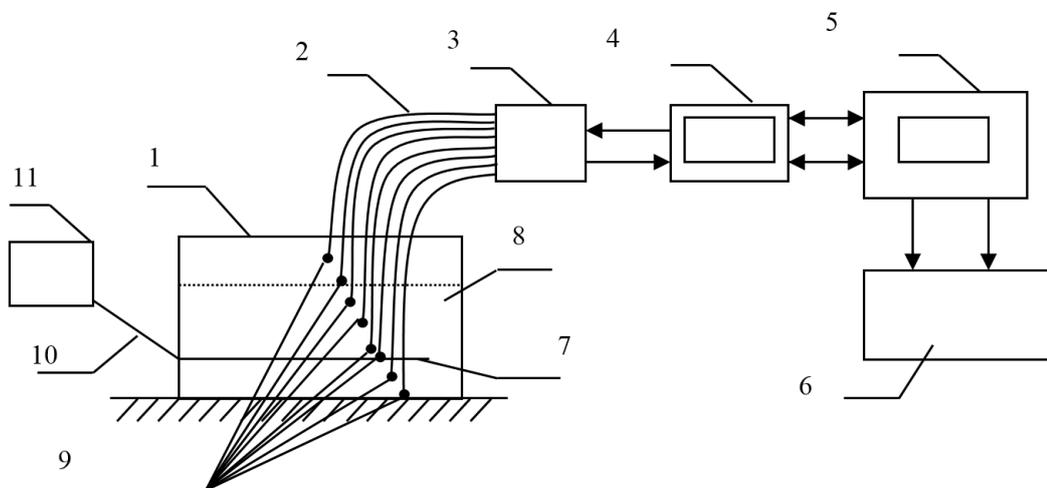


Рис. 5.14. Схема устройства по определению температуры в теле бетона: 1- опалубка; 2 - термопары; 3 – прибор УТК -38; 4 – преобразователь интерфейса; 5- компьютер; 6 – сеть интернет 7 – греющий провод ПНСВ; 8 – исследуемый бетон; 9 – сваренные концы термопар, равноудаленные друг от друга; 10 - «холодные концы» из медной проволоки; 11 - трансформатор.

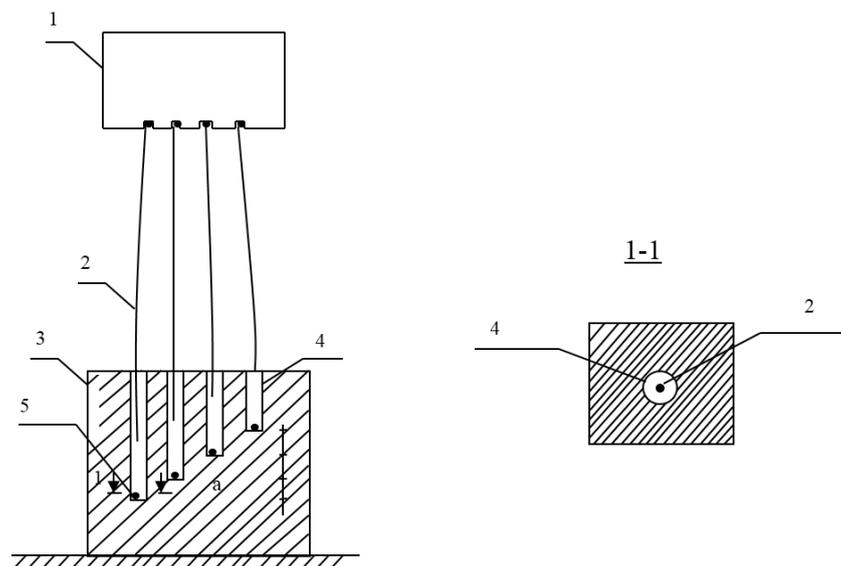


Рис. 5.15. Схема установки термопар в тело бетона: 1 – контроллер УТК-38; 2 - термопарный кабель хромель-копель в гибкой изоляции; 3 - исследуемый образец бетона; 4 – полимерная трубка в бетоне; 5 - сваренный конец термопары

При отрицательных температурах, в частности, при зимнем бетонировании, распространенном на большей части территории Российской Федерации, необходимо учитывать необратимые теплотери при обогреве бетона, а также скорость распространения тепла в толще бетона, которые влияют на скорость его твердения и прочностные характеристики. Такие признаки, как измерение толщины исследуемого объекта, измерение с постоянным шагом во времени t в течение всего эксперимента определяемых теплофизических параметров по формулам, является существенным преимуществом данной установки. Измерение температуры в теле обогреваемого бетона и контроль изменения её скорости при изменении температуры окружающего воздуха, вида и режима прогрева, а также непрерывный температурный мониторинг исследуемого образца по всему объему в течении времени обогрева позволяет дать наиболее полные сведения о теплофизическом состоянии исследуемого штепсельного стыка.

5.4. Выводы по гл. 5

1. Разработаны простые способ и оборудование для укладки свежей самоуплотняющейся бетонной смеси в штепсельный стык, которые при использовании на практике не требуют от работника высокой квалификации и специальной подготовки, а также удобны в применении.
2. Разработана, изготовлена и испытана в лабораторных и производственных условиях автоматизированная установка для электротепловой обработки штепсельных соединений с помощью поверхностного электропрогрева, которая имеет малые размер и массу, позволяющие без труда транспортировать ее одному человеку, проста и удобна в управлении, а подготовка установки к работе выполняется не более, чем 2-мя работниками и занимает 15-20 мин; установка несколько раз была применена в реальных условиях при возведении сборно-монолитных конструкций.
3. Контрольные образцы размером 100x100x100 мм и штепсельного стыка, изготовленные с применением бетонной смеси для укладки в штепсельные стыки, использованной при получении штепсельных соединений в производственных условиях (рис. 5.8÷5.11), которые выдерживались при температурных условиях, соответствующих условиям электротепловой обработки, показали высокие прочность и качество штепсельного стыка, что в сочетании с выше приведенными экспериментальными результатами (гл. 4) не оставляет никаких сомнений в прочности и надежности штепсельных соединений.
4. Установка позволяет выполнять электротепловую обработку по любому графику в автоматическом режиме; график электротепловой обработки задается программным образом и формируется либо на основании исследований характеристик температурных полей в материале области штепсельного соединения с помощью

предложенных в настоящей работе методик (разд. 3.2 и 3.3), либо задается проектировщиком, а применение, в дальнейшем, автоматизированных систем дистанционного (через интернет) и качественного контроля температурных режимов электротепловой обработки штепсельных соединений, обработки поступающей информации и управления процессом такой обработки обеспечит высокое качество штепсельных соединений, существенное снижение доли брака, улучшение условий труда работников и его производительности.

5. Результаты испытания установки показали, что при изменении значения температуры изотермической выдержки от 30 до 40 °С удельный расход электроэнергии возрастает от 60 до 80 кВтч/м³, а время достижения бетоном, уложенным в штепсельные стыки, равной прочности снижается на 22 %; это означает, что существует возможность и необходимость оптимизации процесса электротепловой обработки штепсельных стыков применительно к конкретным условиям его применения, и, безусловно, решение такой задачи является самостоятельной темой дальнейших научно-технических разработок, а важнейшим инструментом ее решения станут предложенные в настоящей работе расчетные методики исследования характеристик температурных полей в процессе электротепловой обработки штепсельных стыков.

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-Pdsolve 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 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_6 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.

б. 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/м³, 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 ими.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахимова, Н. С. Сдвиговая податливость штепсельных стыков железобетонных колонн : дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Абдрахимова Наталья Сергеевна. – Казань, 2016. – 149 с.

2. Анисимов, С. Н. Влияние кварцевого наполнителя и суперпластификатора Glenium® ACE 430 на раннюю прочность мелкозернистого бетона с ускорителем твердения / Л. М. Добщиц, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов и др. // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-9. – С. 1901-1905.

3. Анисимов, С. Н. Влияние комплекса химических модификаторов и мелкодисперсного наполнителя на раннюю прочность растворной смеси [Электронный ресурс] / Ю. А. Минаков, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15809>.

4. Анисимов, С. Н. Влияние модифицирующей добавки Hydro Protect E1 на прочность тяжелого бетона при пониженном содержании минерального вяжущего материала [Электронный ресурс] / О. В. Кононова, Ю. А. Минаков, С. Н. Анисимов и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21283>.

5. Анисимов, С. Н. Влияние поликарбоксилатных суперпластификаторов на структурообразование цементных паст / Л. М. Добщиц, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов, А. Ю. Лешканов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5-5. – С. 945-948.

6. Анисимов, С. Н. Влияние применения комплексной модифицирующей добавки «МЛ-У» на прочность цементных растворов / С. Н. Анисимов, О. В. Кононова А. Ю. Лешканов, А. О. Смирнов // Девятнадцатые Вавиловские чтения: материалы постоянно действующей международной

междисциплинарной научной конференции / под общ. ред. В. П. Шалаева. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – С. 269-271.

7. Анисимов, С. Н. Влияние суперпластификаторов на кинетику схватывания цементных паст / С. Н. Анисимов, О. В. Кононова А. Ю. Лешканов, А. О. Смирнов // Восемнадцатые Вавиловские чтения: материалы международной междисциплинарной научной конференции: в 2 ч. / под общ. ред. В.П. Шалаева. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – Ч. 2. – С. 175-177.

8. 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.

9. Анисимов, С. Н. Интенсификация твердения пластифицированного бетона с добавкой доменного гранулированного шлака / О. В. Кононова, Ю. А. Минаков, С. Н. Анисимов и др. // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 9-2. – С. 228-232.

10. 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>.

11. 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.

12. 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>.

13. 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.

14. Анисимов, С. Н. Модифицированные цементные композиции с кварцевым наполнителем [Электронный ресурс] / Л. М. Добшиц, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7929>.

15. Анисимов, С.Н. Оптимизация процесса твердения цементного камня [Электронный ресурс] / А. Ю. Лешканов, С. Н. Анисимов, О. В. Кононова и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1. – Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=21253>.

16. Анисимов, С. Н. Оценка эффективности использования суперпластификаторов в структуре современных бетонов / С. Н. Анисимов, О. В. Кононова, А. Ю. Лешканов, А. О. Смирнов // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: материалы II Всероссийской студенческой конференции в 8 ч. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – Ч. 5., С. 47-50.

17. Анисимов, С. Н. Пластифицированные бетоны для зимнего бетонирования / 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. 165-166.

18. 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>.

19. Анисимов, С. Н. Прочность и долговечность бетонов в зависимости от дисперсности цемента и наполнителей / Л. М. Добшиц, О. В. Кононова // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: Материалы III Всеросс. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону (12-16 мая 2014). – М. : МГСУ, 2014. – С. 279-290.

20. 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.

21. 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.

22. Анисимов, С. Н. Теплофизические основы и технологические режимы управляемого метода тепловой обработки бетона с применением низковольтных термоактивных опалубочных систем / Ю. А. Минаков, Л. П. Мотовилова, С. Н. Анисимов, А. Ю. Лешканов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 1(5). – С. 78-83.

23. 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.

24. Анисимов, С. Н. Технологические аспекты повышения эффективности применения минеральных добавок в бетонах / С. Н. Анисимов, Л. М. Анисимов, О. В. Кононова // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. 2014. – С. 39-47.

25. Анисимов, С. Н. Управление кинетикой набора прочности бетона при возведении монолитных конструкций в экстремальных условиях / С. Н.

Анисимов, Ю. А. Минаков, Д. А. Семагин, А. О. Смирнов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 1(5). – С. 84-89.

26. 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.

27. 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.

28. Анисимов, С. Н. Формирование структуры бетона с комплексными модифицирующими добавками: проблемы и пути решения / С. Н. Анисимов, О. В. Кононова, А. Ю. Лешканов, А. О. Смирнов // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XI международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам в 4 ч. / редкол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – Ч. 4., С. 193-195.

29. Анисимов, С.Н. Эффективность применения доменного гранулированного шлака в бетонах с добавкой на основе поликарбонатного эфира / О. В. Кононова, С. Н. Анисимов, А. О. Смирнов, А. Ю. Лешканов // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 6-2. – С. 259-263.

30. 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>.

31. Арбенъев, А. С. Зимнее бетонирование с электроразогревом смеси / А. С. Арбенъев. – М : Стройиздат, 1970. – 103 с.

32. Арбенъев, А. С. Массообмен разогретой бетонной смеси с внешней средой / Арбенъев, А. С., Гныря А. И. – Известия вузов. Строительство и архитектура, 1976. – №3. – С. 106-110.

33. Афанасьев, А. А. Возведение зданий и сооружений из монолитного железобетона / А. А. Афанасьев. – М. : Стройиздат, 1990. – 380 с.

34. Афанасьев, А. А. Оценка тепловых полей при ускоренных методах твердения бетонов в монолитном домостроении / А. А. Афанасьев, Ю. А. Минаков // Теоретические основы строительства. – М., 1998. – С. 247–254.

35. Афанасьев, А. А. Оценка тепловых полей при ускоренных методах твердения бетонов в монолитном домостроении / Афанасьев, А. А., Минаков Ю. А. // Материалы VII польско-российского семинара «Теоретические основы строительства». – М. Изд-во Ассоциации строительных вузов. – 1998.

36. Афанасьев, А. А. Порядок теплотехнических расчетов параметров прогрева бетона в узлах омоноличивания «колонна — ригель» Сборно-монолитных каркасных зданий [Электронный ресурс] / А. А. Афанасьев, К. С. Селищев // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. – Вып. 4(29). – 4 с.– Режим доступа: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/AfanasevSelishchev-2013_4\(29\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/AfanasevSelishchev-2013_4(29).pdf).

37. Афанасьев, А. А. Технологии омоноличивания стыков при возведении каркасных зданий / А. А. Афанасьев, К. С. Селищев // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4. – С. 34-38.

38. Афанасьев, А. А. Технологическая эффективность ускоренных методов твердения бетонов в монолитном домостроении Текст. / А. А. Афанасьев, Е. П. Матвеев, Ю. А. Минаков // Бетон и железобетон. 1997. – № 8. – С. 36-37.

39. Баженов, Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. – М.: Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.

40. Баженов, Ю. М. Структурные характеристики бетонов / Ю. М. Баженов, Г. И. Горчаков, Л. А. Алимов, В. В. Воронин // Бетон и железобетон, 1972. – №9. – С. 14-16.

41. Баженов, Ю. М. Технология бетона, строительных изделий и конструкций / Ю. М. Баженов, Л. А. Алимов, В. В. Воронин, У. Х. Магдеев – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. – 350 с.

42. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. – [5-е изд.]. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2011. – 524 с.

43. Баженов, Ю. М. Технология бетонных и железобетонных изделий / Ю.М. Баженов, А. Г. Комар – М.:Стройиздат, 1984. –672 с.

44. Батраков, В. Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы / В. Г. Батраков // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 1-8.

45. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны – М.: Стройиздат, 1990. – 400 с.

46. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В. Г. Батраков. – 2. изд, перераб. и доп. – М., 1998. – 768 с.

47. Берг, О. Я. Высокопрочный бетон / О. Я. Берг, Е. Н. Щербаков, Г. Н. Писанко. – Москва : Стройиздат, 1971. – 208 с.

48. Бетонные и железобетонные работы / К. И. Башлай, В. Я. Гендин, Н. И. Евдокимов и др.; под ред. В. Д. Топчия. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1987. –320 с.

49. Блиничев, В. Н. Повышение эффективности массообменных процессов за счет механоактивации гомогенных и гетерогенных средств // сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского. – Москва : Изд.-во МГУДиТ, 2016. - С. 36-44.

50. ВСН 488-86. Омоноличивание стыков элементов сборных конструкций подземных сооружений. – М. : ММСС СССР, 1987. – 31 с.

51. Высоцкий, С. А. Минеральные добавки для бетонов / С. А. Высоцкий // Бетон и железобетон. – 1994. – № 2. – С. 7-10.

52. Гныря, А. И. Технология бетонных работ в зимних условиях / А. И. Гныря, С. В. Коробков. – Томск : Изд-во ТГАСУ, 2011. – 411 с.

53. Гончаров, М. Е. Прочность стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими элементами, при статическом и кратковременном динамическом нагружениях: дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Гончаров Максим Евгеньевич. – Томск, 2014. – 206 с.

54. Горбунов, С. П. Оптимизация составов тяжелых бетонов применением тонкодисперсных добавок / С. П. Горбунов // Вестник ЮУрГУ. Серия: строительство и арх-ра. – 2012. – №17 (276). – С. 30-35.

55. ГОСТ 18979-2014. Колонны железобетонные для многоэтажных зданий. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 17 с.

56. ГОСТ 24211 – 2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия / взамен ГОСТ 24211-2003, введен 01.01.2011 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М.: Стандартинформ, 2010. – 11 с.

57. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Москва : Изд-во стандартов, 1990. – 10 с.

58. ГОСТ 27006-86. Бетоны. Правила подбора состава / введен впервые, введен 01.07.87 / М. : Изд-во стандартов, 1989. – 10 с.

59. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия / взамен ГОСТ 7473-94, введен 01.01.2012 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М. :Стандартинформ, 2011. – 15 с.

60. Грызлов, В. С. Элементы термодинамики бетона / В.С. Грызлов, Е.В. Меньшикова. – Череповец : ГОУ ВПО ЧГУ, 2005. – 169 с.

61. Гурский, Д. А. Вычисления в MathCAD 12 / Д. А. Гурский, Е. С. Турбина. – М. [и др.] : Питер, 2006. – 544 с.

62. Данилов Н. Н. Электротермообработка бетона / Н. Н. Данилов, М. : Стройиздат, 1972.

63. Денисенко, В. В. Термопары: принципы применения, разновидности, погрешности измерений [Электронный ресурс] / В. В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2012. – № 3. – С. 96-98. – Режим доступа: <http://www.cta.ru/cms/f/447068.pdf>.

64. Добавки в бетон. Технический каталог; апрель, 2014. – М.: Master Builders Solutions, 2014. – 162 с.

65. Добавки в бетон. Технический каталог [Электронный ресурс] / 2009. – 137 с. – Режим доступа: <https://www.nt-stroy.ru/pdfdoc/buklet/dob-beton-teh-katalog.pdf>.

66. Железобетонные и каменные конструкции / [В. М. Бондаренко и др.]; под ред. В. М. Бондаренко. – Изд. 4-е, доп. – Москва : Высш. шк., 2007. – 886 с.

67. Журов, Н. Н. Система температурно-прочностного контроля бетона в раннем возрасте действия / Н. Н. Журов, С. В. Комиссаров // Вестник МГСУ. – 2010. – №4. – С.296-300.

68. Заделка стыков и швов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://hozresurs.ru/show_news_552.html.

69. Замоноличивание стыков, узлов и швов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fccland.ru/montazh/578-zamonolichivanie-stykov-uzlov-i-shvov.html>.

70. Зоткин, А. Г. Бетоны с эффективными добавками: уч.- практич. пособие /А. Г. Зоткин // М.; Вологда: Изд. Инфра-Инженерия. – 2014. – 160 с.

71. Калашников, В. И. Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов / В. И. Калашников, В. Т. Ерофеев В.Т., М.Н. Мороз и др. // Строительные материалы. – 2014. – № 5. – С. 88-91.

72. Козлова, В. К. Продукты гидратации кальцево-силикатных фаз цемента и смешанных вяжущих веществ / В. К. Козлова, Ю. А. Ильевский, Ю. В. Карпова // Изд-во АлтГТУ, Барнаул, 2005. -183 с.

73. Колчеданцев, Л. М. Применение разогретых бетонных смесей для повышения прочности стыка сборно-монолитных зданий / Л. М. Колчеданцев, О. Г. Ступакова, Р. Р. Мустафин // Строительные материалы. 2012. № 4. С. 17-19.

74. Колчеданцев, Л. М. Технологические основы монолитного бетона. Зимнее бетонирование: монография / Л. М. Колчеданцев, А. П. Васин, И. Г. Осипенкова, О. Г. Ступакова // Издательство "Лань". 2018. 280 с.

75. Красовский Б. М. Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования: учебное пособие для вузов / Б.М. Красновский. - 2-е изд., доп. - М. : ГАСИС , 2007. -470 с.

76. Королёв, Е. В. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы / Е. В. Королёв, Ю. М. Баженов, А. И. Альбакасов – Пенза, Оренбург: ИПК ОГУ, 2010. – 364 с.

77. Красовский, П. С. Технология конструкционных материалов / П. С. Красовский. – Москва : Форум, 2013. – 302 с.

78. Леонович, С. Н. Капиллярная усадка и трещинообразование бетона в раннем возрасте / С. Н. Леонович // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017. – № 3. – С. 22-33.

79. Леонович, С. Н. Трещиностойкость бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке: алгоритм расчета по обобщенному критерию / С. Н. Леонович // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 1(5). – С. 42-51.

80. Люк, К. Изменения, происходящие в цементном камне с минеральными добавками за двадцатилетний период / К. Люк, Е. Е. Ляховски // Цемент и его применение. – 2011. – №1. – С. 76-80.

81. Матков, Н. Г. Применение эпоксидных полимеррастворов в стыках колонн при отрицательной температуре / Н. Г. Матков, А. Н. Волгушев // Промышленное строительство. –1978. – № 4. – С. 42-44.

82. Мацкевич, С. М. Нестационарная задача теплопроводности в операторном виде и ее численно-аналитическое решение/ С. М. Мацкевич, В. Н. Сидоров // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering / Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. – Volume 10, Issue 3. – 2014. – pp. 121-127.

83. МДС 12-48.2009. Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов / М.: ЗАО «ЦНИИОМТП», 2009.– 18 с.

84. Методы бетонирования с искусственным прогревом бетона монолитных конструкций в опалубке [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.spb-komplekt.ru/catalogue.php?Cat_part=142.

85. Мизонов, В. Е. Теоретические основы математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов/ Р. М. Алоян, С. В. Федосов, В. Е. Мизонов // Монография. ИГАСУ; ИГЭУ. Иваново, 2011. – 256 с.

86. Минаков, Ю. А. Возведение зданий из монолитного бетона в термоактивной опалубке: учеб. пособие / Ю. А. Минаков, В. А. Сленьков. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. – 260 с.

87. Миронов, С. А. Теория и методы зимнего бетонирования / С. А. Миронов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1975. – 700 с.

88. Мчедлов-Петросян, О. П. Гидратация и твердение цемента / О. П. Мчедлов-Петросян // Цемент, 1980. – №12. – С. 10-11.

89. Мчедлов-Петросян, О. П. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов / О. П. Мчедлов-Петросян, А. В. Ушеров-Маршак, А. М. Урженко, М. :Стройиздат, 1984. – 225 с.

90. Мчедлов-Петросян, О. П. Управляемое структурообразование основных положений физико-химической механики / О. П. Мчедлов-Петросян // Управляемое структурообразование в производстве строительных материалов. – Киев. :Изд. Будивельник, 1968. – С. 3-5.

91. Мчедлов-Петросян, О. П. Химия неорганических строительных материалов / О. П. Мчедлов-Петросян – М.: Стройиздат, 1988. - 304 с.

92. 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.

93. Пат. 2246459 Российская Федерация. Суперпластификатор для товарного бетона [Электронный ресурс] / Вовк А. И., Дмитриев А. А., Злотников М.Г., Тузенко Г.Н.; – 2001126924/04, заявл. 05.10.2001; опубл.: 20.02.2005.

94. Пат. 2259964 Российская Федерация. Сухая цементно-песчаная смесь / Хозин В. Г., Морозова Н. Н., Хохряков О. В.; заявитель и патентообладатель Казанская государственная архитектурно-строительная академия. – № 2004111211/03; заявл. 05.04.2004; опубл. 10.09.2005, Бюл. № 25. – 7 с.

95. 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.

96. 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.

97. Пособие по электрообогреву бетона монолитных конструкций : (СНиП Ш-15-76). – М. : Стройиздат, 1985. – 56 с.

98. Прогрев монолитного бетона [Электронный ресурс] – Режим доступа:https://best-stroy.ru/statya_progrev-monolitnogo-betona_923.

99. Прогрев бетона термоэлектроматами – современный способ ускорения твердения бетона [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.flexyheat.ru/termomat-progreb-betona>.

100. Пшонкин, Н.Г. Моделирование тепловых процессов непрерывного электротеплопрогрева потока бетонной смеси в трубах / Н. Г. Пшонкин // Изв. ВУЗов., Строительство. -1994. -№4. -С. 53-56.

101. Руководство по применению бетонов с противоморозными добавками / НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР НИИЖБ. – Москва : Стройиздат, 1978. – 81 с.

102. Рекомендации по применению суперпластификатора марки С-3 в бетоне. – М. : НИИЖБ, 1979. – 14 с.

103. Рекомендации по проектированию и выполнению контактных стыков с отрывом арматуры в железобетонных колоннах многоэтажных зданий. – М. : НИИЖБ, 1985. – 50 с.

104. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / под ред. Б. А. Крылова, С. А. Амбарцумяна, А. И. Звездова. – Москва, 2005. – 275 с.

105. Садович, М. А. Методы зимнего бетонирования / М. А. Садович. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. –104 с.

106. Синайко, Н.П. Новые бетоны самоуплотняющегося типа. Добавки Relanorm и средства испытаний / Н. П. Синайко // Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка. – 2011. – № 39. – С. 97-98.

107. Современные строительные технологии : монография / Байбурин А. Х, Беркович Л. А., Головнев С. Г., Коваль С. Б., Кучин В. Н., Мельник А. А. // М-во образования и науки Рос. Федерации, Юж.-Урал. гос. ун-т; под ред. С. Г. Головнева. - Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2010. - 262 с.

108. Соколова, Ю. А. Эпоксидные полимербетоны, модифицированные нефтяными битумами каменноугольной и карбамидной смолами и аминопроизводными соединениями / под общей редакцией академика РААСН Ю.А. Соколовой и член-корреспондента РААСН В. Т. Ерофеева;

В.Т. Ерофеев, Ю.А. Соколова, А.Д. Богатов и др. – М.: Издательство «Палеотип», 2008. – 244с.

109. Соколов А. М. Научные основы процессов электротепловой обработки композиционных материалов в производстве конструкционного бетона : дис. д-р техн. наук : 05.2.13 / Соколов Александр Михайлович. – Иваново, 2012. – 391 с.

110. СП 70.13330.2012 Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП3.03.01-87 / М. : Федеральный центр строительства, 2013. – 205 с.

111. Стандарт СТ-НП СРО ССК-04-2013 Температурно-прочностной контроль бетона при возведении монолитных конструкций в зимний период / Челябинск. ; 2013. – 25 с.

112. Стыки сборных железобетонных конструкций / Под ред. А. П. Васильева. – Москва : Стройиздат, 1970. – 189 с.

113. Технологическая карта на электротермообработку бетона при замоноличивании стыков сборных железобетонных конструкций / Ю. А. Ярымов. – Москва : 1997. – 36 с.

114. Титов, М.М. Управляемые температурные режимы тепловой обработки бетона при зимнем бетонировании монолитных строительных конструкций / Ю. А. Попов, С. Н. Андриевский, Ю. В. Лунев, В. В. Молодин, А. С. Суханов, М. М. Титов // Известия ВУЗов. Строительство. 2010. №4. С. 77-91.

115. Трембицкий, С.М. Технические и организационные основы зимнего бетонирования монолитных железобетонных конструкций с прогревом бетона // Бетон и железобетон. -2007. -№6. -С.20-24.

116. Трембицкий, С.М. Энерго- и ресурсосбережение в заводской и строительной технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций / С. М. Трембицкий. – М. : ОАО «Издательство «Стройиздат», 2004. – 23-24 с.

117. Трембицкий, С.М. Энергосберегающие технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций / С. М. Трембицкий // Бетон и железобетон. №6. 2006г. С. 23-26.

118. Усадка бетона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rus-stroy.net/usadka-betona>.

119. Ушеров-Маршак, А.В. Бетоноведение : лексикон / А. В. Ушеров-Маршак. – Москва : Стройматериалы, 2010. – 110 с.

120. Ушеров-Маршак, А.В. Добавки нового поколения / А. В. Ушеров-Маршак // Химические и минеральные добавки в бетон. – Харьков : Колорит, 2005, с. 45-50.

121. Ушеров-Маршак, А.В. Модифицирование бетона – объект научно-технологического анализа [Электронный ресурс] / А. В. Ушеров-Маршак // Технологии бетонов. – 2016. – №9-10. – С. 60. – Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/520850>.

122. Ушеров-Маршак, А.В. Термокинетика как направление физико-химического анализа в бетоноведении / А. В. Ушеров-Маршак // Технологии бетонов, № 11-12, – 2010, – С. 64-66.

123. Федосов, С.В. Исследование параметров установок для электротепловой обработки железобетонных изделий / С. В. Федосов, В. И. Бобылев, А. М. Соколов // Бетон и железобетон. -2011. -№ 2. -С. 26-29.

124. Федосов, С.В. Исследование параметров электротепловой обработки бетона токами различной частоты / С. В. Федосов, В. И. Бобылёв, Ю. А. Митькин, А. М. Соколов // Строительные материалы. -2009. -№ 5. -С. 51-53.

125. Федосов, С.В. Исследование суточной прочности бетона при электротепловой обработке бетона токами различной частоты / С. В. Федосов, В. И. Бобылев, Ю. А. Митькин, А. М. Соколов // Строительные материалы. 2010. № 3. С. 52-54.

126. Федосов, С. В. Математическое моделирование процесса набора прочности бетоном при электротепловой обработке / С. В. Федосов, В.И.

Бобылёв, А. М. Ибрагимов, В. К. Козлова, А. М. Соколов // Строительные материалы. -2012. № 4. С.36-39.

127. 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. 35-49.

128. Федосов, С.В. Методика расчётной оценки характеристик температурных полей в объёме материала при автоклавной обработке ячеистых бетонов / С. В. Федосов, А. Н. Кузнецов, А. М. Соколов // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК): сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием). – Иваново: ИВГПУ, 2015. – С. 258-260.

129. Федосов, С.В. Методика расчета параметров электротепловой обработки бетонных смесей и железобетонных изделий на установках периодического действия / С. В. Федосов, В. И. Бобылев, А. М. Соколов // Известия ВУЗов «Строительство». -2010. -№ 5. -С. 104-113.

130. Федосов, С.В. Методика расчёта предельных температурных градиентов в железобетонных изделиях в процессе электротепловой обработки / С. В. Федосов, В. И. Бобылев, А. М. Ибрагимов, А. М. Соколов // Строительные материалы. – 2011. – № 3. – С. 44-46.

131. Федосов, С.В. Методология исследования процессов теплопереноса и показателей электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты / С. В. Федосов, А. М. Соколов // Academia. РААСН. - 2012. -№ 2. С.117-123.

132. Федосов, С.В. Моделирование набора прочности бетоном при гидратации цемента / С. В. Федосов, В. И. Бобылёв, А. М. Ибрагимов, В. К. Козлова, А. М. Соколов // Строительные материалы. - 2011. №11. С. 38-41.

133. Федосов, С. В. Моделирование прогрева стеновых панелей при термической обработке / С. В. Федосов [и др.] // Строительные материалы. – 2007. – №2. – С. 86-87.

134. Федосов, С.В. Нестационарный процесс теплопереноса в монолитном железобетонном перекрытии при использовании термоактивной опалубки / С. В. Федосов, А. М. Ибрагимов, А. В. Гуцин // Строительные материалы. – 2006. – №2. – С.56-57. – №3. – С.70.

135. Федосов, С.В. Оценка показателей экономической эффективности электротепловой обработки на предприятиях сборного железобетона / С. В. Федосов, В. И. Бобылёв, А. Б. Петрухин, А. М. Соколов // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 7. – С. 54-57.

136. Федосов, С.В. Применение методов математической физики для моделирования массо и энергопереноса в технологических процессах строительной индустрии / С. В. Федосов, А. М. Ибрагимов, А. В. Гуцин// Строительные материалы. –2008. –№4. – С.65-67.

137. 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.

138. Федосов, С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии : монография / С. В. Федосов. – Иваново : ИПК "ПресСто", 2010. – 363 с.

139. Федосов, С.В. Электротепловая обработка бетона токами повышенной частоты на предприятиях сборного железобетона / С.В. Федосов, В. И. Бобылёв, А. М. Соколов. – Иваново : Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина, 2016. – 335 с.

140. Хердтл, Р. Долговечность бетонов на основе многокомпонентных цементов / Р. Хердтл, М. Дитерманн, К. Шмидт//Цемент и его применение. – 2011. – № 1. – С. 76-80.

141. Хохряков, О.В. Безусадочный цементный раствор для омоноличивания стыков железобетонных конструкций : дис. канд. техн. наук : 05.23.05 / Хохряков Олег Викторович. – Казань, 2006. – 207 с.

142. Чернышев Ю. П., Козлова Л. А., Рейниш В.П. Опыт производства и применения в технологии бетона суперпластификатора дофен // Химические добавки бетонов. – М. 1987. – С 47.

143. Чернышев, Ю. П. Пластичный бетон / Ю. П. Чернышев, Л. А. Козлова. – Донецк : Донбасс. – 1987. – 62 с.

144. Чернышов, Е.М. Развитие теории системно-структурного материаловедения и высоких технологий строительных композитов нового поколения/ Е. М. Чернышов // Строительные материалы. -2011. -№ 7. -С. 54-60.

145. Штарк, Й. Химия цемента и долговечность бетона. Позднее образование этtringита в бетоне / Й. Штарк, К. Больман // II международное совещание по химии и технологии цемента. – М., 2000. – т.1. – С. 64-93.

146. Щембаков В. А. Сборно-монолитное каркасное домостроение. Чебоксары, 2004, с. 96.

147. Anisimov S. Self-compacting fine-grained concrete for reinforced concrete frame joints filling / Anisimov S., Kononova O. V // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 21, Construction - The Formation of Living Environment. 2018. С. 032050.

148. Kjellsen, K. O. Influence of Natural Minerals in the Filler Fraction on Hydration and Properties of Mortars/ K. O. Kjellsen, B. Lagerblad //The Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm. – 1995. –P. 41

149. Łukowski P. Influence of temperature on efficiency of superplasticizing Admixtures for concrete [Электронный ресурс] / P.Łukowski // Chem. 1 (2016). –P. 31-36 – Режим доступа: http://building-chemistry.com/archive/2016/Lukowski-JBCh-2016_31-36.pdf.

150. Ouchi M, Nakamura S, Osterson T, Hallberg S. E, Lwin M. Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States. Proceedings of

the 3rd PCI/FHWA International Symposium on High Performance Concrete, US Department of Transportation and Federal Highway Transportation (FHWA), Orlando, Florida, USA. – 2003.

151. Petit, J. Coupled effect of time and temperature on variations of yield value of highly flowable mortar [Электронный ресурс] / J. Petit, K. Khayat, E. Wirquin // Cement & Concrete Research, № 36 (2006). – P. 832-841– Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/260096066_Coupled_effect_of_temperature_and_superplasticizer_on_rheological_properties_of_SCC_mortar.

152. Regnaud, L. Changes in cement paste and mortar fluidity after mixing induced by PCP: a parametric study / L. Regnaud, A. Nonat, S. Pourche and oth. // Proceedings of the 8th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. – Sorrento, October 20-23, 2006. – P. 389-408.

153. Schmidt, W. Design concepts for the robustness improvement of Self-Compacting Concrete – Effects of admixtures and mixture components on the rheology and early hydration at varying temperatures / W. Schmidt // PhdThesis, Eindhoven University of Technology, the Netherlands, 2014.

154. Schmidt, W. Influences of superplasticizer modification and mixture composition on the performance of self-compacting concrete at varied ambient temperatures / W. Schmidt, H. J. H. Brouwers, H-C. Kühne, B. Meng // Cement & Concrete Composites. – №49. – P. 111–126.

155. Sidorov, V. N. Discrete-analytic solution of unsteady-state heat conduction transfer problem based on a theory of matrix function / V. N. Sidorov, S. M. Matskevich // Procedia Engineering. – Volume 111. – 2015. – pp. 726-733.

156. Yamada, K. S. Ogawa, S. Hanahara. Working mechanism of poly-beta-naphthalene sulfonate and polycarboxylatesuperplasticizers types from point of cement paste characteristics / K. Yamada, S. Ogawa, S. Hanahara // 6th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. – 2000. – P. 367-382.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Общество с ограниченной ответственностью
«КаркасСтрой»



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «КаркасСтрой»

Михеев Н.А.

» 2013 г.

о внедрении результатов кандидатской
диссертационной работы Анисимова
Сергея Николаевича

Комиссия в составе: председатель директор ООО «КаркасСтрой» Михеев Н.А., члены комиссии: генеральный директор ООО «ЦентрМКС» Лазарев И.А., прораб ООО «КаркасСтрой» Хафизов Н.Ф., к.т.н., зав. кафедры СМиТС ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет» Кононова О.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы аспиранта Анисимова Сергея Николаевича использованы при строительстве многоквартирного жилого дома по адресу: Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, севернее дома 72 по ул. Димитрова, в виде применения растворной самоуплотняющейся смеси с модификатором на основе поликарбоксилатного эфира и кварцевого наполнителя с удельной поверхностью 100 м²/кг для заливки монолитного узла сопряжения сборных железобетонных колонн с ригелями при пересечении осей зданий 5-К на отметке -1,130 м. включая:

1. Результаты экспериментальных исследований по разработке антикоррозионной высокопрочной растворной смеси наливного типа для замоноличивания стыков сборных железобетонных конструкций;
2. Рекомендации по применению предложенной растворной смеси при заливки стыковых шпунтовых соединений фундамента и колонны первого этажа.
3. Рекомендации по технологии заливки узла сопряжения сборных железобетонных колонн с ригелями.

Оценка физико-технологических свойств примененной самоуплотняющейся растворной смеси показала, что ее использование позволяет повысить качество заливки монолитного узла сопряжения сборных железобетонных колонн с ригелями при сохранении прочностных и антикоррозионных свойств материала стыка; сократить экономические затраты за счет применения разработанной смеси с использованием местного наполнителя.

Председатель комиссии:

Генеральный директор
ООО «КаркасСтрой»

Члены комиссии:

Генеральный директор
ООО «Центр МКС»

Прораб СМУ
ООО «КаркасСтрой»

Научный руководитель
к.т.н., зав. каф. СМиТС
ФГБОУ ВПО «ПГУ»

Михеев Н.А.

Лазарев И.А.

Хафизов Н.Ф.

Кононова О.В.

**Общество с ограниченной ответственностью
«Центр многофункционального каркасного строительства»**

Генеральный директор ООО «Центр МКС» _____
Лазарев И.А.
_____ 2012 г.



А К Т

о внедрении результатов
кандидатской диссертационной работы
Анисимова Сергея Николаевича

Комиссия в составе: председатель генеральный директор ООО «Центр МКС» Лазарев И.А., члены комиссии: генеральный директор ООО «КаркасСтрой» Михеев Н.А., прораб ООО «КаркасСтрой» Кобяков С.А., к.т.н., доцент кафедры СМиТС ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет» Кононова О.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы аспиранта Анисимова Сергея Николаевича использованы при строительстве пятиэтажного многоквартирного жилого дома по адресу: Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Кутузова 30, в виде применения термоактивной опалубки с автоматическим программным управлением процесса тепловой обработки бетона для обогрева растворной смеси в шпунтовом соединении арматуры фундамента и колонны в условиях низких температур.

Применение данной разработки позволило минимизировать энергопотребление при обогреве стыков шпунтовых соединений фундамента и колонны, с учетом проектных требований к железобетону.

Председатель комиссии:

Генеральный директор
ООО «Центр МКС» _____ Лазарев И.А.

Члены комиссии:

Генеральный директор
ООО «КаркасСтрой» _____ Михеев Н.А.

Прораб ООО «КаркасСтрой» _____ Кобяков С.А.

Научный руководитель, к.т.н.
доцент кафедры СМиТС ФГБОУ «ПГТУ» _____ Кононова О.В.



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 123161

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ОБОГРЕВАЕМОГО
БЕТОНА ПО ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ В
НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Поволжский государственный технологический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011154259

Приоритет полезной модели 28 декабря 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 декабря 2012 г.

Срок действия патента истекает 28 декабря 2021 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2603991

**МЕЛКОЗЕРНИСТАЯ САМОУПЛОТНЯЮЩАЯСЯ
БЕТОННАЯ СМЕСЬ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Поволжский государственный технологический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015117992

Приоритет изобретения 13 мая 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 ноября 2016 г.

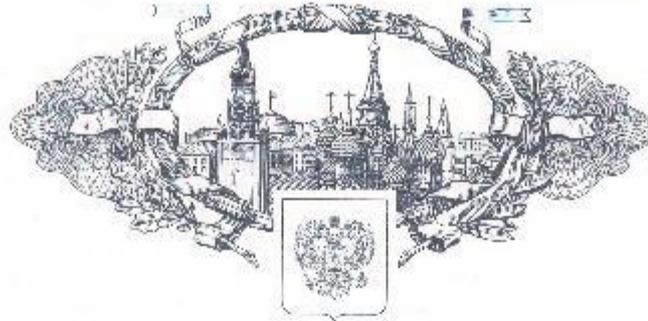
Срок действия патента истекает 13 мая 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2507355

**ТЕРМОАКТИВНАЯ ОПАЛУБКА С АВТОМАТИЧЕСКИМ
ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПРОЦЕССОМ
ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА**

Патентообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Поволжский государственный технологический университет (RU)*

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2012133062

Приоритет изобретения 01 августа 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 февраля 2014 г.

Срок действия патента истекает 01 августа 2032 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

