

Титов Михаил Михайлович

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВА БЕТОННОЙ СМЕСИ В
ТЕХНОЛОГИИ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ**

05.23.08 - Технология и организация строительства

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО Алтайском государственном техническом университете и ФГБОУ ВПО Томском государственном архитектурно-строительном университете

Научный консультант: - доктор технических наук, профессор
Алексей Игнатьевич Гныря

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Александр Сергеевич Арбенев
- доктор технических наук, профессор
Юрий Игоревич Бик
- доктор технических наук, профессор
Нелли Карповна Скрипникова

Ведущая организация - Санкт-Петербургский государственный
архитектурно - строительный университет

Защита состоится “23” марта 2012 г. в 14-00 на заседании диссертационного Совета Д 212.265.01 в Томском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, корп.5, ауд. 307, тел./факс (3822) 653362
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного архитектурно-строительного университета

Автореферат разослан февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета _____ Н.О. Копаница

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие добывающих, перерабатывающих и энергоемких производств в Сибири, в районах Крайнего Севера вызывает необходимость круглогодичного строительства при среднегодовой температуре $-5,5$ °С. Это обуславливает внимание строительной науки к технологии производства бетонных работ в зимнее время.

Наиболее эффективным по скорости набора прочности в первые сутки является метод бетонирования с предварительным электроразогревом бетонной смеси (ПЭРБС). Метод особенно эффективен при производстве бетонных работ при низкой температуре воздуха с возможностью нагрева бетонной смеси до максимальных температур.

Анализ производственного опыта и результатов исследований отечественных и зарубежных ученых в области технологии ПЭРБС показывает, что используемая технология и оборудование не позволяют достичь требуемых температур нагрева бетонной смеси и обеспечения необходимого ресурса работоспособности и надежности оборудования.

Нерешенность вопросов, связанных с установлением причин, вызывающих неравномерность температурных полей в межэлектродной области, приэлектродное кипение бетонной смеси и обрастание фазных электродов схватившимся бетоном приводит к быстрой потере скорости нагрева смеси и нестабильному к.п.д. устройств для электроразогрева. Применение других методов зимнего бетонирования приводит к повышенным затратам трудовых, материальных и особенно энергетических и временных ресурсов и не соответствует высокопроизводительным средствам доставки, подачи и укладки бетонной смеси в современные опалубочные формы. Это противоречие в комплексе процессов существующей технологии зимнего бетонирования делает актуальными вопросы совершенствования технологии предварительного электроразогрева бетонной смеси путем значительного повышения уровня работоспособности и надежности используемого оборудования, увеличения эффективности процесса электроразогрева бетонной смеси.

Исследования по этим вопросам выполнялись в период с 1997 по 2011 год и являются развитием работ по проблемам зимнего бетонирования, выполненных в НИИЖБ, СПбГАСУ, МГСУ, ВладГУ, ТГАСУ, НГАСУ, и др. вузах и НИИ РФ.

Объектом исследования является технология зимнего бетонирования с предварительным электроразогревом бетонной смеси.

Предметом исследования являются: процессы формирования электрических и тепловых полей в межэлектродном объеме устройств для электроразогрева бетонной смеси.

Цель работы: расширение технологических возможностей способа предварительного электроразогрева бетонной смеси путем повышения ресурса работоспособности и к.п.д. используемого оборудования на основе совершенствования процесса электроразогрева.

Задачи исследования: для достижения поставленной цели необходимо решить следующие теоретические и практические задачи:

1. Установить физическую причину, приводящую к приэлектродному кипению бетонной смеси и последующей быстрой потере работоспособности электроразогревающего устройства.
2. Разработать методы исследования неравномерности температурных полей в устройствах циклического и непрерывного действия.
3. Разработать способ устранения явления приэлектродного кипения бетонной смеси в устройствах циклического и непрерывного действия.
4. Предложить и обосновать количественный критерий равномерности электротепловых полей в процессе электроразогрева бетонной смеси и на этой основе оценить качество известного и предлагаемого процесса электроразогрева, оборудования и технологии.
5. Разработать достоверную методику электротехнического, конструктивного и технологического расчета устройств для электроразогрева бетонной смеси.
6. Исследовать кинетику величины к.п.д. в процессе электроразогрева и разработать режим нагрева, дающий максимальный итоговый к.п.д.
7. Выполнить производственную проверку результатов исследований. Разработать технологическую документацию на зимнее бетонирование с использованием предлагаемых конструктивно-технологических решений по предварительному электроразогреву бетонной смеси.

Основная идея работы заключается в том, что быстрое обрастание фазных электродов схватившимся бетоном вызвано резким всплеском в области ребер фазных электродов напряженности электрического поля E . Исключение торца и ребер фазного электрода из поля проводимости смеси ортогональной диэлектрической поверхностью выравнивает поля плотности тока J , тепловыделения w и температуры t .

Методология проводимых исследований основана на теоретических положениях, разработанных и развиваемых в отечественных и зарубежных научных школах МВТУ (Николаев Г.А.), МЭИ (Крутов В.И.), НИИЖБ (Миронов С.А., Крылов Б.А., Лагойда А.В.), ВладГУ (Арбеньев А.С.), ТГАСУ (Гныря А.И.), H. Schenck, University of Rhode Island, R. Feynman, University of Massachusetts. Используемые методы исследования: литературный и патентный поиск, анализ и обобщение, теоретическое исследование и физический эксперимент, численный эксперимент в среде моделирования ELCUT, MATHCAD.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается методологической базой исследований, основанной на фундаментальных научных положениях и современных методах исследования: аналитического аппарата теории цепей переменного тока, закономерностей теории электромагнитного поля, теории колебаний, метода конечных элементов в основе пакета прикладных программ ELCUT, MATHCAD; достаточным объемом экспериментальных данных с использованием метода сведения энергетического баланса в лабораторных и производственных экспериментах, а также сравнением полученных расчетных данных с экспериментальными значениями.

Научная новизна работы.

1. Развита научная основа и теоретические положения, которые впервые позволили установить физическую причину, приводящую к неравномерности электротепловых полей в бетонной смеси и разработать способы устранения данного явления, с высокой точностью количественно оценить равномерность электротепловых полей в процессе электроразогрева и потребляемую при этом электрическую мощность.
2. Установлено, что причиной неравномерности электрических и тепловых полей в межэлектродном объеме электроразогревающихся устройств является краевой эффект, который проявляется в резком увеличении напряженности электрического поля E , плотности тока J , тепловыделения w и температуры t на ребре и торце фазного электрода и обусловлен многократно повышенной плотностью электрических зарядов в области ребра, вследствие установившегося равновесия зарядов на всей поверхности электрода.
3. Установлено, что заглабление торцов фазных электродов в ортогональный диэлектрический корпус устраняет неравномерность J , w и t полей, что качественно увеличивает ресурс работоспособности электроразогревающихся устройств с 20-25 циклов до 800 и более.
4. Получены новые знания о кинетике величины к.п.д. в процессе электроразогрева бетонной смеси. Установлено, что величина к.п.д.

функционально зависит от режима потребляемой мощности и для максимизации величины к.п.д. скорость роста температуры смеси должна быть пропорциональна мгновенной разности температуры смеси и воздуха, т.е. температура, напряжение и потребляемая мощность должны расти экспоненциально с заданным темпом нагрева.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработан новый технологический передел предварительного электроразогрева бетонной смеси, который позволяет за счет устранения неравномерности электротепловых полей значительно повысить ресурс работоспособности электроразогревающих устройств и эффективность самой технологии при установленном уровне качества, как процесса разогрева, так и смеси, укладываемой в опалубку.

На основе проведенных научных исследований были разработаны, изготовлены и использованы в производстве устройства для циклического и непрерывного электроразогрева с исключением мест локального перегрева бетонной смеси и электродов.

Теоретически и экспериментально установлено, что для исключения перегрева бетонной смеси в устройствах для непрерывного электроразогрева бетонной смеси с коаксиальной схемой межэлектродного пространства поверхность внутреннего и внешнего электродов в любом поперечном сечении должна быть ортогональна электроизоляционным элементам.

Полученные визуализированные результаты расчета электрических и тепловых полей в предлагаемых устройствах для циклического и непрерывного электроразогрева бетонной смеси позволили существенно сократить время создания новых образцов оборудования с требуемыми параметрами.

Разработан «Технологический регламент», в котором обоснованы рекомендации по электротехническому, конструктивному и технологическому расчету устройств для циклического и непрерывного электроразогрева, позволяющие исключить локальный перегрев бетонной смеси и электродов, даны рекомендации по эксплуатации такого оборудования.

Составлен пакет прикладных программ «Автоматизированное рабочее место проектировщика устройств для электроразогрева бетонных смесей». Материалы диссертации используются при чтении лекций и выполнении лабораторных работ по курсу «Физические основы строительных процессов», отдельных разделов в курсе «Технология строительных процессов», выполнении дипломных работ и магистерских диссертаций по направлению «Строительство» в НГАСУ (Сибстрин).

Реализация результатов исследований. Основные научные положения, полученные в исследованиях, и практические рекомендации внедрены в ОАО СтройГАЗ (СУ-4, СУ-1, СУ-3), КЖБИ-2, КПП Ал-

тайтранстроя, ЗАО РОСТЕК, ООО «СМР», БЗКБИ, (г.Барнаул), ОАО «Оргтехстрой», ООО «Евросити» (г. Новосибирск), ЗАО «Проектно-технический центр» (г. Вологда), ЗАО «Стройсиб» (г. Абакан) и других строительных организациях РФ.

Апробация исследования. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на 46-68 научно-технических конференциях НГАСУ (Сибстрин), на конференциях МГСУ, ТГАСУ, ВлГУ, АлтГТУ, СГУПС, на совещании-семинаре «Непрерывный электроразогрев бетонной смеси в строительстве» (Ленинград, 1991 г.), на международной научно-технической конференции «Композиты - в народное хозяйство России» (Барнаул, 1995 г.), международной научно-технической конференции «Вузовская наука на международном рынке научно-технической продукции» (Барнаул, 1995 г.), международной научно-технической конференции «Энергообработка бетонной смеси в строительстве» (Владимир, 1996 г.), международной научно-технической конференции «Синэргобетонирование изделий и конструкций» (Владимир, 1997 г.), международной научно-технической конференции «Обобщение теории и практики синэргобетонирования» (Владимир, 2003 г.), 12 Сибирская (международная) конференция по железобетону (Новосибирск, 2010 г.).

На защиту выносятся:

- ◆ установленная причина локального опережающего нагрева смеси в области ребер фазного электрода и резкого, более чем до десяти раз, всплеска значений E , J , w и t – как проявление краевого эффекта;
- ◆ способ устранения неравномерности J , w , t полей заглублением торцов фазных электродов в ортогональный диэлектрический корпус, при котором эти поля выравниваются, что дает качественное увеличение ресурса работоспособности электроразогревающих устройств;
- ◆ способ исключения возникновения зон локального перегрева бетонной смеси в устройствах для непрерывного электроразогрева с коаксиальным межэлектродным пространством, при котором поверхность внутреннего и внешнего электродов в любом поперечном сечении должна быть ортогональна электроизоляционным элементам.
- ◆ результаты численного моделирования в программном комплексе ELCUT 5.7 полей потенциала U , напряженности E , плотности тока J , тепловыделения w , температуры t , градиента температуры G , плотности теплового потока F в электроразогревающих устройствах, подтверждающие наличие краевого эффекта в фазных электродах. (использование более простых программных продуктов не дает возможности учесть краевые эффекты на ребрах фазных электродов);

- ◆ безразмерный критерий равномерности электротепловых полей в межэлектродном объеме в процессе электроразогрева бетонной смеси как отношение скорости нагрева смеси в области ребра электрода к скорости нагрева средней по объему - симплекс A_p ;
- ◆ рекомендации по методике электротехнического, и на этой основе конструктивного и технологического расчета устройств для электроразогрева бетонной смеси;
- ◆ новое критериальное уравнение, описывающее процесс электроразогрева с одновременным использованием его электротехнических, конструктивных и технологических параметров;
- ◆ установленная закономерность функциональной зависимости величина к.п.д. от режима потребляемой мощности;
- ◆ способ стабилизации и максимизации величины к.п.д. при любых внешних температурах, при котором скорость роста температуры смеси должна быть пропорциональна мгновенной разности температуры смеси и воздуха, т.е. температура должна расти экспоненциально с заданным темпом нагрева.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 40 научных статьях и докладах (в том числе по перечню ВАК – 11); по теме диссертации получено 5 авторских свидетельств и патентов на изобретения и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, основных выводов и приложения, содержит 273 страницы основного текста, 84 рисунка и 12 таблиц. Список литературы включает 263 наименования.

Автор считает своим долгом выразить благодарность и глубокую признательность научному консультанту д.т.н., профессору Гныре А.И., д.т.н., профессору Курцу В.И. за многолетнее научное общение, полезные советы и консультации при работе над диссертацией, аспирантам Власову В.А., Рязанову А.И, к.т.н. Южакову И.В., которые вместе с автором участвовали в решении актуальных задач зимнего бетонирования, а также производственникам, принявшим активное участие в проверке и освоении новой технологии на строительных площадках: Хадамянцу Н.Х. (ОАО СтройГАЗ), Башаеву А.В. (ЗАО РОСТЕК), Лейсле В.А. (БЗКБИ) г. Барнаул, Уханову В.П. (ЗАО «Проектно-технический центр», г. Вологда.), Ещину В.С. (ЗАО «Стройсиб» г. Абакан).

Содержание работы

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи

исследования, научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации и внедрении основных результатов в производство.

В первой главе (*Анализ теории и проблемы практики технологии электроразогрева бетонной смеси*) приведен анализ состояния основных вопросов, поставленных многолетней практикой бетонирования и составляющих проблему повышения эффективности технологии предварительного электроразогрева бетонных смесей (далее ПЭРБС). В деле создания и развития технологии ПЭРБС в нашей стране большое значение имеют труды А.С. Арбеньева, Г.А. Айрапетов, С.А. Миронова, Б.А. Крылова, А.В. Лагойды, А.И. Гныри, В.И. Зубкова, В.П. Лысова, С.Г. Головнева, Р.В. Вегинера, Н.Н. Данилова. Существенный вклад в разработку научных представлений о работе и проектировании электроразогревающих устройств (далее ЭРУ) порционного и непрерывного действия внесли А.С. Арбенев, Н.Ф. Афанасьев, Л.М. Колчеданцев, Д.С. Михановский, Н.Г. Пшонкин, А.П. Шешуков, П.И. Шварцман, А.А. Игнатъев, А.Г. Квашнин и др. Однако анализ имеющегося практического опыта использования существующего оборудования в технологии ПЭРБС показал, что в настоящее время отсутствуют действенные рекомендации по конструированию электроразогревающих устройств (далее ЭРУ) с равномерными температурными полями в межэлектродном объеме (далее МЭО), вследствие чего бетонная смесь у фазных электродов всех без исключения ЭРУ греется в 3-4 раза быстрее, чем в МЭО. У исследователей не наблюдается единого мнения о природе этого явления и поэтому отсутствуют действенные меры по его нейтрализации. Нет точной методики электротехнического расчета ЭРУ. Отсутствуют достоверные сведения и о кинетике формирования электротепловых полей в МЭО. Не обнаружено также каких-либо исследований о причинах нестабильности к.п.д., кроме противоречивых сведений о его итоговой величине. Такое положение объективно сдерживает развитие метода и конкурентноспособность самой технологии ПЭРБС. В связи с этим назрела необходимость в решении следующих важных вопросов:

1. Какова физическая причина явления локального перегрева бетонной смеси и фазного электрода, вызывающего все известные недостатки технологии ПЭРБС.
2. Как устранить это отрицательное явление в устройствах циклического и непрерывного действия.
3. Как количественно оценить качество (равномерность электротепловых полей) процесса ПЭРБС в том или ином устройстве.
4. Как достоверно определить потребляемую разогревающим устройством электрическую мощность и силу тока в линиях.

5. Как и почему изменяется величина к.п.д. в процессе разогрева, каковы способы его повышения и управления им.

Пути решения этих вопросов конкретизируются в сформулированных в первой главе задачах исследования.

Во второй главе (Электрофизические закономерности процесса электроразогрева бетонных смесей) развиты научные основы и теоретические положения, которые впервые позволяют установить физическую основу явлений, приводящих к неравномерности электротепловых полей. Экспериментально во второй главе было установлено, что причиной ускоренного нагрева металла фазного электрода служит локальный ускоренный нагрев бетонной смеси до 100 °С и последующее её непрерывное кипение в области ребер и торца фазного электрода, расположенных в объеме смеси. В результате серии отсеивающих экспериментов и сопутствующих теоретических исследований было установлено, что причиной локального нагрева смеси служит резкий, до десятков раз, всплеск значений E, J, w, t в области ребер и торца фазных электродов и что главной причиной этого является известный из электростатики краевой эффект. Экспериментально установлено, что все отрицательные последствия проявления краевого эффекта локализуются в области ребра и торца. Для дальнейшего изучения этого эффекта применительно к технологии электроразогрева бетонной смеси необходимо применять теоретические методы исследования. Из теории краевых задач известно, что в стационарном случае дифференциальные уравнения обычного эллиптического типа краевая задача сводится к граничному условию общего вида:

$$\alpha \cdot u \cdot |S + \beta \frac{\partial u}{\partial n} | \cdot S = f$$

где $u(x)$ – искомая функция, $\frac{\partial u}{\partial n}$ – ее производная по нормали к границе S , коэффициенты α, β и правая часть f заданы на границе S . При $\alpha=1, \beta=0$ краевая задача сводится к задаче Дирихле, при $\alpha=0, \beta=1$ – к задаче Неймана. Аналитические решения краевых задач, возможные лишь для простейших случаев, весьма сложные и крайне трудоемкие. Но имеющиеся в настоящее время программные и аппаратные средства позволяют относительно быстро и достоверно рассчитывать качественные и количественные характеристики полей потенциала U , напряженности E , плотности тока J , тепловыделения w , температуры t , градиента температур G и плотности тепловых потоков F различных конструктивных систем типа «электрод-бетонная смесь». Визуализируя при этом в цвете результаты расчетов по каждому из полей и предоставляя возможность получить численное значение любой величины в любой точке, по любому направлению и в любое время процесса, а также получить график любых величин по заданному направлению или в точке во времени. Одним из таких программных средств является комплекс ELCUT 5.7, который может ав-

томатически задавать шаг минимальной дискретизации для детальной проработки исследуемой области в общем количестве до ста тысяч элементов. ПК ELCUT 5.7 в задачах растекания токов позволяет рассчитывать распределение полей U , E , J , w , t , G , F в системе проводников первого и второго рода. Эти задачи описываются уравнением Пуассона для скалярного электрического потенциала U (вектор J лежит при этом в плоскости модели). Для плоскопараллельных задач растекания тока уравнение имеет вид:

$$\partial/\partial x \cdot (1/\rho_x \cdot \partial u/\partial x) + \partial/\partial y \cdot (1/\rho_y \cdot \partial u/\partial y) = 0$$

Для решения тепловых задач используется уравнение теплопроводности линейного вида в плоском случае:

$$\partial/\partial x \cdot (\lambda \cdot \partial t/\partial x) + \partial/\partial y \cdot (\lambda \cdot \partial t/\partial y) = -q - c \cdot \gamma \cdot \partial t/\partial \tau$$

В первую очередь была проведена серия лабораторных экспериментов, чтобы достоверно убедиться в адекватности результатов программы и физического процесса. Для этого в лабораторном ЭРУ производился нагрев Ц/П раствора состава 1:1 с В/Ц = 0,35. Температурное поле контролировалось 12 ХК термопарами изолированными от электрических полей и подсоединенными к измерителям температуры ИТ-6 и через адаптер сети РСА-01 с помощью интерфейса RS-232 к персональному компьютеру, в котором показания записывались с интервалом 1 секунда. После обработки сравнивались расчетные (Рис.2) и фактические (Рис.1) температурные поля. Установлено, что общий характер изотерм в обоих случаях практически равнозначен, а следовательно равнозначны и картины других полей. Имеющиеся незначительные отклонения результатов эксперимента от расчета объясняется искажением электрического и температурного поля, создаваемого самими ХК термопарами.

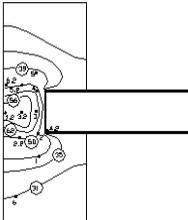


Рисунок 1. Экспериментальное распределение температур и изотермы.

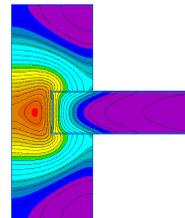


Рисунок 2. Визуализированный результат численного моделирования температур и изотерм

Таким образом экспериментально и теоретически показано, что среда визуального моделирования ELCUT 5.7 адекватно рассчитывает поля t а значит и поля U , E , J , w , G , F . Имея такой мощный инструмент, нами было исследовано множество известных решений устройств для ПЭРБС циклического и непрерывного действия и практически все они имели высокую неравномерность E , J , w , t , G , F полей, а значит и незначительный ресурс работоспособности, что подтверждается практикой их использования в реальном производстве. На рис. 3- 5 приведены результаты численного расчета плотности тока J , температуры t и плотности теплового потока F на краю плоского стального электрода. В лабораторных экспериментах наблюдалось в момент начала кипения смеси два локальных очага в тех местах, где возле ребер плотность тока наибольшая. Было установлено, что любые конфигурации концов фазных электродов (заострения, закругления, приварка труб по периметру и т.д.) качественно картину локального перегрева смеси не меняют. В теоретической части исследований показано, что при одинаковом потенциале на фазном электроде напряженность электрического поля обратно пропорциональна радиусу кривизны поверхности электрода. Поскольку наименьший радиус кривизны поверхности на ребре электрода, там и наибольшая (намного, в десятки раз) напряженность электрического поля. На рис.3 видно, что максимальная плотность тока, в десятки раз превосходящая среднее значение по плоскости электрода, локализуется в области ребер электрода.

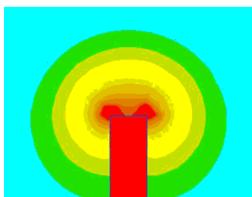


Рисунок 3. Плотность тока на ребрах электрода

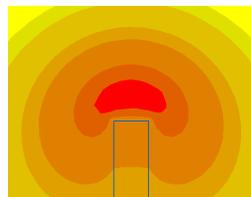


Рисунок 4. Температура на краю электрода

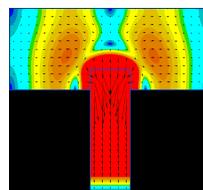


Рисунок 5. Тепловые потоки на краю электрода

Поскольку тепловыделения, а значит и температура, пропорциональны плотности тока в квадрате, то наибольшая температура (100°C) в момент начала приэлектродного кипения воды затворения бетонной смеси возникает в области ребра и торца электрода, но не у самого металла, а на некотором удалении от него, 5-8мм. Для количественного анализа в работе приводятся графики плотности тока, температуры, удельного тепловыде-

ления и градиента температуры по направлению n от ребра электрода (под углом 45°).

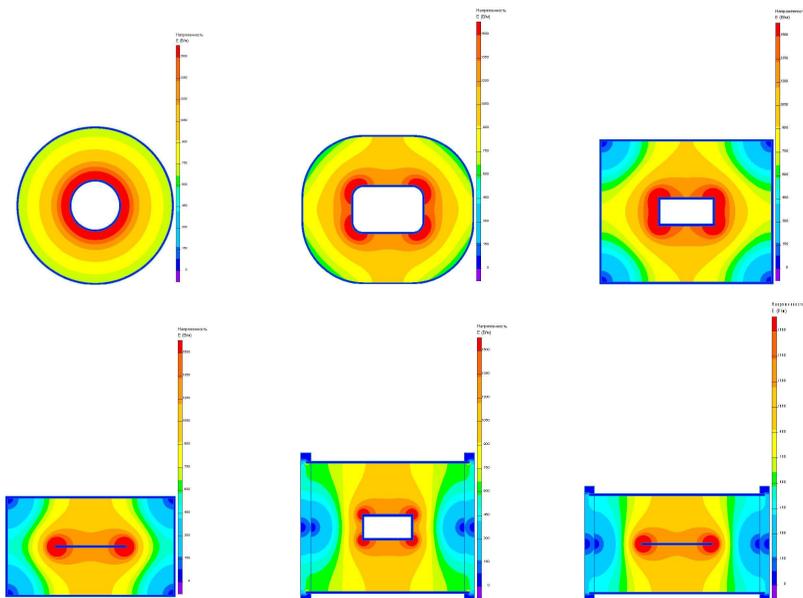


Рисунок 6. Результаты численного моделирования напряженности электрического поля фазного электрода в устройствах различного исполнения.

Из графиков J и w следует, что большая часть тепловыделения поглощается металлом электрода сначала в области торца, а затем и всем электродом, т.к. его теплопроводность более чем в двадцать раз больше, чем у бетонной смеси. Остальное выделившееся тепло рассеивается в окружающей край электрода бетонной смеси, что и видно на рис. 5. Приведенные на рис.6 результаты численного моделирования напряженности электрического поля у фазного электрода в устройствах различного исполнения хорошо иллюстрируют наличие краевого эффекта в фазных электродах практически всех известных устройствах для электроразогрева бетонной смеси.

В третьей главе (Способы совершенствования технологии циклического электроразогрева) рассматриваются вопросы снижения и полного устранения известных отрицательных последствий проявления краевого эффекта. С помощью ПК ELCUT 5.7 было проанализировано большое количество всевозможных конструктивных решений электроразогревающих устройств. Установлено и подтверждено на практике, что электро-

изоляция плоскости металлического корпуса, перпендикулярного фазному электроду снижает показатель неравномерности температурных полей – симплекс A_p . Производственные испытания показали, что такой способ снижает A_p до безразмерной величины 1,8 (рис.7 и рис.8).



Рисунок 7. Внешний вид первого устройства со сниженным $A_p = 1.8$

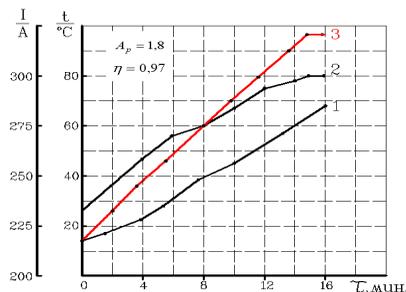


Рисунок 8. График роста силы тока (2) и температуры бетонной смеси (1 и 3)

Более значительный эффект удалось получить снижением толщины фазного электрода с 10 мм до 0,8 мм. Это дало снижение величины критерия A_p до $1,2 \div 1,28$. Установлено с помощью ПК ELCUT 5.7, что это происходит не из-за уменьшения всплеска E в области края электрода, а вследствие уменьшения теплопроводного сечения электрода и соответственно снижения до 10 раз теплового потока F вдоль электрода от периферии к центру. Барнаульское предприятие ЗАО РОСТЕК выпускало длительное время подобное оборудование и поставляло в различные регионы страны (рис.9 -10).



Рисунок 9. Первые экземпляры ЭРУ с электродами толщиной 0,8 мм. на диэлектрических коробах.

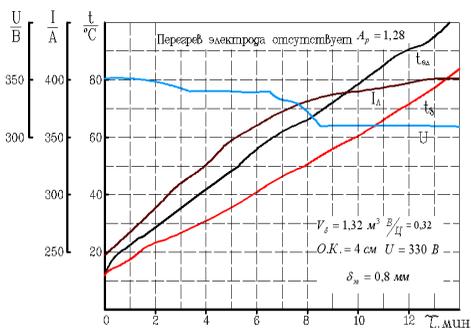


Рисунок 10. Кинетика основных параметров процесса электроразогрева ЭРУ.

Уменьшение толщины фазного электрода до $0,8 \div 1,0$ мм. совместно с электроизоляционной стенкой корпуса, перпендикулярной плоскости фазного электрода, как было установлено с помощью численного моделирования, снижает критерий A_p до 1. Оба решения проверены в производственных условиях и отмечена их высокая (на протяжении всего зимнего периода) работоспособность. ЭРУ с такой конструктивной схемой фазных электродов практически обладали свойством равномерного температурного поля, но сложное и на первых порах ненадежное техническое воплощение механической части ЭРУ объемом $0,87 \text{ м}^3$ позволило тем не менее им проработать весь зимний сезон без потери качества разогрева (рис.11-12).

Интерактивный поиск решения с использованием ПК ELCUT 5.7 позволил установить, что полностью решает проблему неравномерности \mathbf{J} , \mathbf{w} , \mathbf{t} полей заглублиение торцов фазных электродов в диэлектрический корпус, а верхняя часть торцов должна выступать из бетонной смеси (чтобы торец и ребра электрода были вне поля проводимости смеси). В этом случае поля \mathbf{J} , \mathbf{w} , \mathbf{t} получаются равномерными, значения критерия $A_p < 1 \approx 0.85$. Полученное решение защищено патентом RU 2193484 «Способ защиты электродов при электроразогреве бетонной смеси». Приведенные ниже результаты численного моделирования поясняют суть предложения. Оно заключается в том, что поскольку устранить краевой эффект как физический невозможно, но можно избежать его отрицательные последствия путем исключения зоны повышенной концентрации напряженности электрического поля из области токов проводимости в бетонной смеси. Это можно сделать путем помещения зоны повышенной концентрации напряженности электрического поля в диэлектрическую область – электроизолятор (текстолит, резина или воздух).



Рисунок 11. Изготовление фундаментных блоков с разогревом смеси в специальном ЭРУ. Пат.2058895

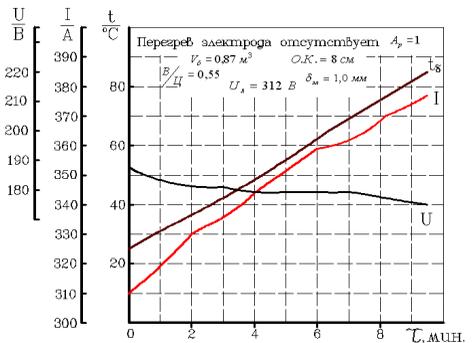


Рисунок 12. Кинетика основных параметров процесса электроразогрева в специальном ЭРУ

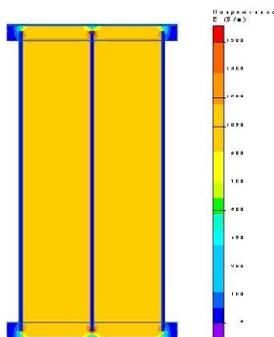


Рисунок 13. Распределение напряженности электрического поля E между электродами в предложенных ЭРУ, (расчетное)

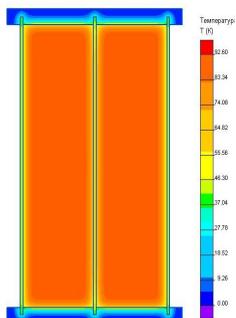


Рисунок 14. Распределение температуры смеси между электродами в предложенных ЭРУ, (расчетное)

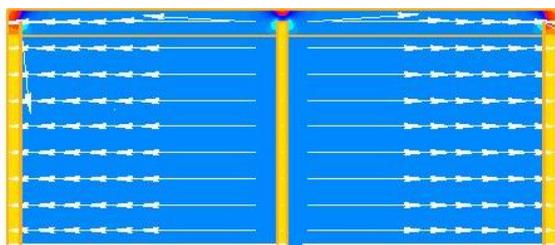


Рисунок 15. Микрокартина распределения электрического поля E в области торца электродов в предлагаемых ЭРУ, (расчетное).

Из визуализированных результатов расчетов на рис.13-15 видно, что концентрация электрического поля E на ребрах фазных электродов сохраняется, но она локализована в диэлектрике. При этом в области проводимости бетонной смеси все электротепловые поля равномерны.

Для производственной проверки предложенного способа были изготовлены два поворотных бункера объемом 1 куб.м для бетонирования изделий заводской номенклатуры (блоки, плиты, сваи и др.). На рис.16 представлен общий вид поворотного бункера, по патенту RU 2193484. На рис.17 представлен процесс укладки жесткой бетонной смеси в опалубку сборного элемента СОГ.

Толщина стенок элемента 10 и 15см., высота 100см., размеры в плане 3х3м. Внутренний блок-пуансон вынимался мостовым краном через 5-10 мин. после укладки разогретой смеси и ее вибропроработки. Оценка

прочности, набранной после 14 часов остывания изделия, показала $50\%R_{28}$. Учитывая температуру в не отапливаемом цеху в ночное время $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отсутствие какого-либо утепления изделия (а с внутренней стороны и отсутствие опалубки), результат следует признать положительным. На рис.18 приведены графики изменения электрофизических параметров в устройстве, реализующем способ защиты фазных электродов от перегрева в процессе электроразогрева (патент RU 2193484). Из графиков (Рис.18) видно, что токи по фазам, потребляемая мощность и среднеобъемная температура бетонной смеси непрерывно растут с возрастающей скоростью. Температура смеси возле электрода ниже среднеобъемной на протяжении всего периода разогрева. Падение напряжения и к.п.д. объясняется большой потребляемой мощностью, сравнимой с мощностью ячейки ТП.



Рисунок 16. Общий вид поворотного бункера по патенту RU 2193484



Рисунок 17. Процесс укладки жесткой бетонной смеси в опалубку элемента СОГ.

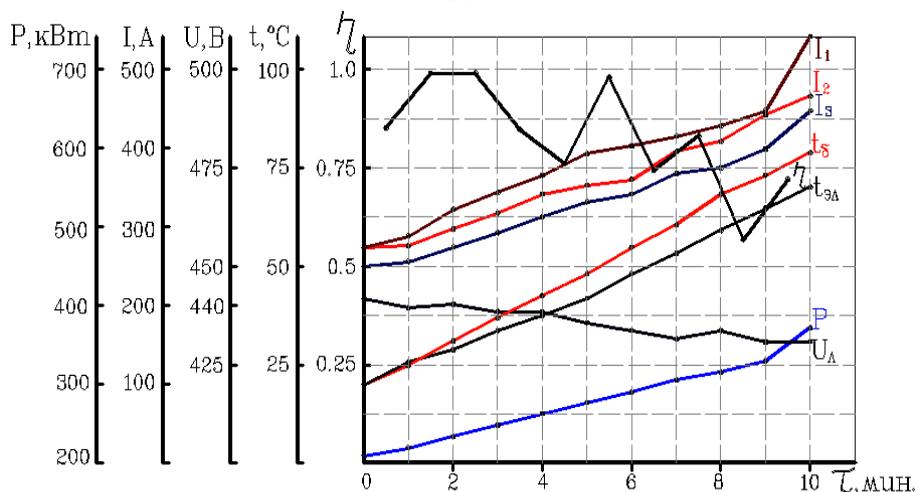


Рисунок 18. Графики изменения электрофизических параметров в бункере в процессе электроразогрева бетонной смеси.

Критерий качества процесса ПЭРБС получился $A_p < 1 \approx 0.85$, что связано с достижением высокой равномерности температурных полей в межэлектродном объеме смеси. Такой результат качества процесса предварительного электроразогрева бетонной смеси получен впервые с момента возникновения технологии ПЭРБС. Средний к.п.д. в итоге был равен 0.84.

Таким образом, один из самых перспективных способов зимнего бетонирования получил новую техническую базу, созданную в результате длительных научных исследований. Технология предварительного электроразогрева бетонной смеси в настоящее время имеет реальные возможности для дальнейшего развития и распространения.

В четвертой главе (Способы совершенствования технологии непрерывного электроразогрева бетонной смеси) проводится анализ известных ЭРУ непрерывного действия и на этой основе предлагается геометрия устройства для непрерывного электроразогрева бетонной смеси с равномерными электрическими и тепловыми полями. Методикой для создания ЭРУ непрерывного действия, у которого не происходило бы обрастание фазных электродов цементным камнем, был выбран морфологический анализ и синтез. Основой методики является морфологическая таблица, составляемая на основе патентных исследований и экспертных оценок. Найденное таким методом техническое решение реализует все функции ЭРУ непрерывного действия.

Первый численный эксперимент оценки наличия мест локального перегрева в ЭРУ непрерывного действия предложенной конструкции (патент РФ № 2342248) проводился с помощью программного комплекса

ELCUT 5.7. На рис. 19 представлен общий вид устройства.



1. Бетонная смесь
2. Внешний (нулевой) электрод – труба
3. Внутренний (фазный) электрод – труба
4. Электроизоляционные элементы
5. Приемная воронка
6. Подающая труба
7. Отводящая труба
8. Затвор

Рисунок 19. Схема исследуемого ЭРУ непрерывного действия

Так как данный программный комплекс способен решать только стационарные задачи, то и в эксперименте электрические и тепловые поля в ЭРУ непрерывного действия рассматривались в стационарном режиме, когда смесь в межэлектродном объеме находится в покое, а расчет производился для величины расчетного значения удельного сопротивления смеси (ρ_p). Тем самым моделировалось (путем замены линейной координаты временной) движение бетонной смеси в ЭРУ. В рамках данного эксперимента решалась задача исследования межэлектродного пространства ЭРУ непрерывного действия посредством качественного и количественного анализа наиболее характерных продольных и поперечных сечений визуализированных параметров электрического и теплового полей. По этим сечениям были рассчитаны электрические параметры поля: распределение потенциалов, напряженности, плотности тока, удельного тепловыделения; и тепловые параметры поля: температуры, градиенты температуры и тепловые потоки. Анализ результатов расчета электрических полей и связанных с ними тепловых полей показал, что использование “Способа защиты электродов при электроразогреве бетонной смеси” при такой геометрии электродной камеры возможно, но наблюдается локальные участки перегрева в области сопряжения наружной трубы и принятого электроизоляционного элемента.

В результате анализа мест локализации очагов неравномерности электрических и тепловых полей в межэлектродном объеме, была предложена усовершенствованная геометрия электроизоляционного элемента, исключая возможность неравномерных полей рядом с электроизоля-

тором. На рис. 20 в сечениях 3-3 - 6-6 показана суть изменения: в любом поперечном сечении электроизоляционного элемента образующей линией его поверхности служит радиус из продольной оси коаксиала.

Второй численный эксперимент оценки наличия мест локального перегрева в ЭРУ непрерывного действия проводился так же с помощью программного комплекса ELCUT 5.7. На рисунке 21 представлен продольный разрез исследуемого устройства, на которое получен патент на полезную модель от 28.07.08 за № 77571 “Устройство для электроизоляции фазных трубчатых электродов”.

Расчеты электрических (U, E, J, ω) полей и связанных с ними тепловых (t, G, F) полей показали, что при такой геометрии электродной камеры проявлений краевого эффекта на фазном электроде нет и локальный перегрев бетонной смеси и электродов отсутствует (рисунки 21-22). Для подтверждения выводов, сделанных после численного эксперимента для ЭРУ непрерывного действия, представленного на рисунке 21, была проведена экспериментальная проверка. Изготовлено ЭРУ непрерывного действия, в котором установлены электроизоляционные элементы на входе и выходе бетонной смеси из электродной камеры. Чтобы убедиться в правильности предложенного устройства на входе электроизоляционный элемент был закругленной, но произвольной формы, а на выходе – в нижнем конце электродной камеры ЭРУ- элемент предложенной геометрии, представленной на рис. 20 в сечениях 3-3 – 6-6 (патент на полезную модель № 77571). Исследование с разогревом бетонной смеси в ЭРУ непрерывного действия для упрощения экспериментальной проверки и ее адекватного соотношения с полученными расчетными параметрами производился в циклическом режиме. В процессе эксперимента производился замер температуры с помощью ХК термопар, установленных на внутренней стороне трубы фазного электрода в указанных на рис. 20. точках. Термопара № 0 подсоединялась к тестеру, а термопары с 1 по 12 подсоединялись к измерительным приборам ИТ-6 и через блок сопряжения к компьютеру. Снятие показаний термопар производилось с 5-ти секундным интервалом.

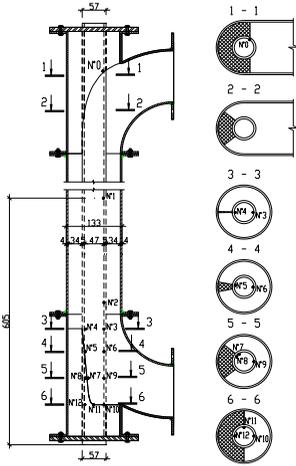


Рисунок 20. Сечения и положение точек измерения температуры

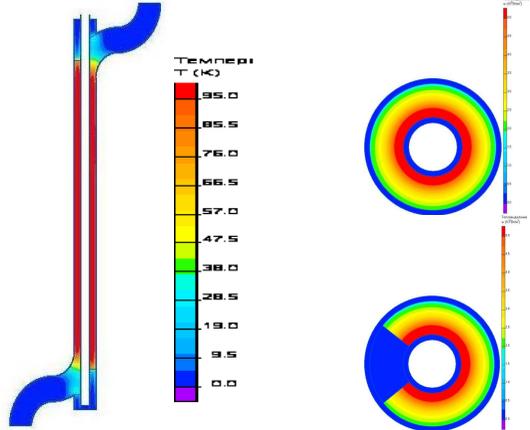


Рисунок 21. Распределение t - полей вдоль электродной камеры

Рисунок 22. Распределение W полей поперек электродной камеры

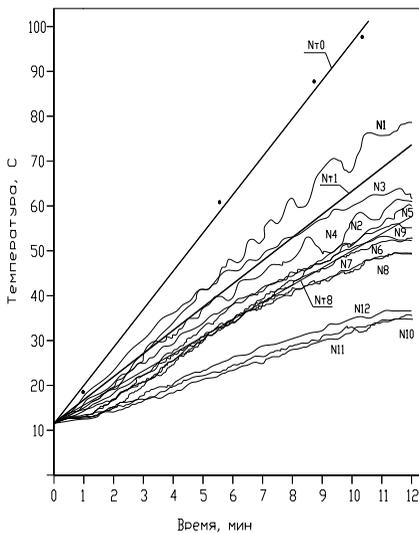


Рисунок. 23. Результат экспериментальных замеров температуры по точкам, приведенным на рис. 20



Рисунок. 24. Общий вид установки в процессе эксперимента. (патент на полезную модель за № 77571)

Для оценки соотношения температуры на внутренней стороне фазного электрода и температуры бетонной смеси в межэлектродном объеме предварительно был произведен электроразогрев той же смеси, в таком же коаксиальном устройстве (с теми же диаметрами), но высотой 0.2м. Характер распределения температур показывает, что измеренная с внешней стороны фазного электрода температура бетонной смеси и температура с внутренней стороны металла фазного электрода отличается на 4-5 °С. Измеренная таким образом температура более достоверная, так как измерительные датчики не искажают естественное строение электрического и других полей. Полученные в эксперименте значения температур в этих точках сравнивались с расчетными по программе ELCUT 5.7. График на рисунке 23 отражает результат экспериментальных замеров температуры по точкам, указанным на рисунке 20. На рис. 24 дан общий вид установки. Поскольку термопары с 1 по 12 находились в нижней части ЭРУ, то их показания практически равны теоретическим (график NT 1) или ниже (точки 10,11,12). Это объясняется формой электроизоляционного элемента, который исключает проявление краевого эффекта. Но в верхнем сечении 1-1, где была установлена термопара № 0, где электроизоляционный элемент был выполнен закругленной, но произвольной формы, наблюдалось проявление краевого эффекта со всеми сопутствующими признаками, т.е. быстрый рост температуры смеси и начало приэлектродного кипения в сечении 1-1 на момент времени 10 мин. 45 сек. Впервые полученные результаты эксперимента позволяют сделать вывод о том, что использование коаксиальной электродной камеры для непрерывного разогрева смеси при котором поверхность внутреннего и внешнего электродов в любом поперечном сечении должна быть ортогональна электроизоляционным элементам, обеспечивают отсутствие мест локального перегрева смеси и электродов, что является необходимой предпосылкой для создания работоспособной технологии непрерывного электроразогрева бетонной смеси.

В пятой главе (*Разработка методов электротехнического расчета, конструктивного и технологического проектирования электроразогревающих устройств*) рассматриваются вопросы электротехнического расчета устройств для нагрева смеси. Ключевым вопросом электротехнического расчета ЭРУ является установление связи между величиной расчетного значения удельного электрического сопротивления нагреваемой бетонной смеси (ρ_p) и получающимися при этом величинами линейных токов I_A , I_B , I_C . Предлагаемые до настоящего времени формулы дают погрешность от 42 до 67 %, т.к. их основой служит лишь закон Ома и закон Джоуля - Ленца. На основании производственных наблюдений было установлено, что весь ток протекает между плоскостями электродов и боко-

вых стенок и на основании этого была принята эквивалентная электрическая схема замещения ЭРУ с плоскопараллельными электродами, решение по которой производилось аналитическим, графоаналитическим и графическим способом для прямой (ABC) и обратной (ACB) последовательности фаз. Во всех шести случаях получился один и тот же результат. Линейный ток по среднему электроду В при любом значении соотношения межэлектродных расстояний ξ составляет

$$I_B = U_L : R \cdot \sqrt{3} \quad , \text{ где} \quad (2)$$

R - сопротивление объема бетонной смеси между фазными электродами. Токи I_A и I_C на практике не равны между собой, несмотря на явную симметрию нагрузок, и это явление обусловлено электромагнитным переносом энергии с одной фазы на другую (особенной при плоскопараллельных электродах или параллельной трехфазной воздушной подводящей линии). Но среднеарифметическое их значение строго соответствует расчетному.

$$(I_A + I_C) : 2 = (U_L : R) \cdot \sqrt{1 + \xi + (\xi^2 : 3)} \quad , \text{ где} \quad (3)$$

ξ - соотношение линейных и фазных сопротивлений. Из этой формулы следует, что при $\xi = 1,73$ температура средних и крайних отсеков получается одинаковой, а при $\xi = 1,36$ линейные токи должны быть одинаковы, а температура разной. Это обстоятельство позволяет более осознанно подходить к конструированию ЭРУ и иллюстрируется графиками на рис.25, где

$$\Psi_{1,3} = \sqrt{1 + \xi + (\xi^2 : 3)} \quad , \quad \Psi_2 = \sqrt{3} \quad .$$

Мощность, потребляемая ЭРУ во время разогрева, определится:

$$P = 2 \cdot \{ U_\phi \cdot I_B + [U_\phi \cdot (I_A + I_C) : 2] \cdot (\xi : 3) \} \quad , \text{ где} \quad (4)$$

U_ϕ - напряжение между фазой и нулем. Формулы 2, 3, 4, служат основой для методики электротехнического расчета ЭРУ с плоскопараллельными электродами. Точность предлагаемой методики 1-2% по сравнению с предшествующими, у которых она составляет 40-60%.

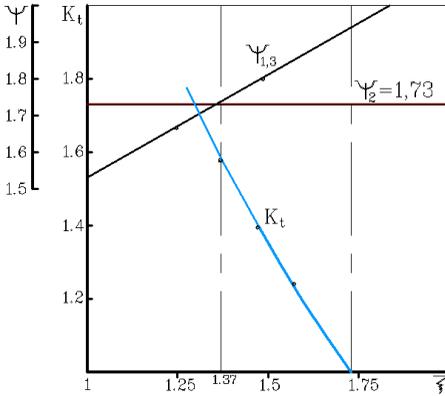


Рисунок 25. Зависимость соотношения коэффициентов при расчете токов в линии $\frac{\Psi_2}{\Psi_{1,3}}$ и температуры K_t в средних и крайних отсечках от соотношения межэлектродных расстояний ξ .

При определении расчетного времени нагрева смеси, температурного интервала нагрева и скорости нагрева следует учитывать, что при этом используется значение параметра к.п.д. Поскольку его итоговая величина имеет вероятностные значения при неуправляемом процессе электроразогрева, то и расчет значений этих технологических параметров носит вероятностный характер. Предлагаемая методика содержит задаваемые потребностями и возможностями конкретного производства исходные условия и получаемые при этом расчетные выходные результаты. Поэтому любой расчет носит итерационный характер и требует знаний и опыта. Для обобщенного описания электротехнических, конструктивных и технологических параметров устройств для ПЭРБС в работе предложено новое критериальное уравнение:

$$(c \cdot \gamma \cdot S \cdot \Delta t \cdot \rho_p) : (U^2 \cdot \Delta \tau \cdot \eta) = S : l^2, \text{ где} \quad (5)$$

c – удельная теплоемкость бетонной смеси; γ – объемная плотность смеси; S – сечение нагреваемой смеси; l – расстояние между электродами.

С помощью этого отношения можно при первоначальном проектировании обеспечить выполнение главного технологического параметра – v_H , скорости нагрева, используя ниже приведенные графики на рис.26.

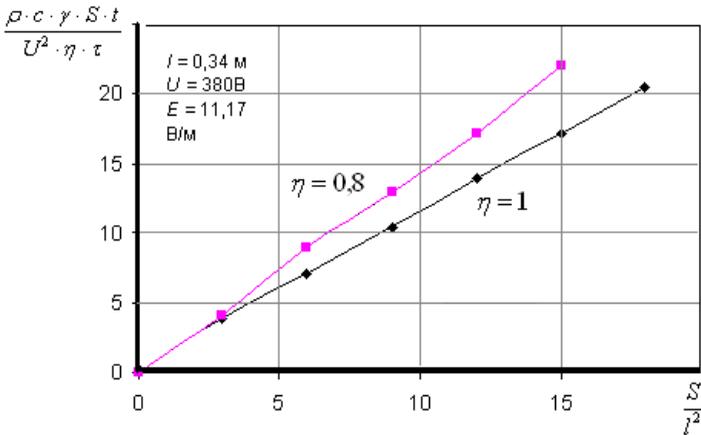


Рисунок 26. – Критериальная зависимость при $l = 0,34 \text{ м}$ и $U = 380 \text{ В}$

Варьируя параметры l , S , Δt , $\Delta \tau$ можно по этим графикам определить габариты и потребляемую мощность при требуемой скорости нагрева. При значительном упрощении метода расчета погрешность не превышает 4-5%.

В шестой главе (Повышения энергетической эффективности технологии предварительного электроразогрева бетонной смеси) рассматриваются вопросы повышения энергетической эффективности процесса электроразогрева смеси – к.п.д. процесса.

В существующей технологии нагрева смеси, при использовании прямого включения устройства в ячейку ТП и наличии нескольких других нагрузок, величина к.п.д., как впервые установлено, хаотично, аperiodически пульсирует в диапазоне величин от 0,2 до 0,99. При этом даже средние итоговые значения от разогрева к разогреву не повторяются т.е. параметр к.п.д. не управляем и непредсказуем. Для эффективности процесса нагрева смеси важно, чтобы к.п.д. (или η) = const, был как можно выше и по возможности увеличивался за время разогрева. Для объяснения явления осцилляции величины η был использован принцип изоморфизма общей теории смеси, который постулирует подобие процессов в природе любого уровня сложности. При изучении изоморфизма свойств субстанций различной физической природы – перемещения в механике, тока в электродинамике и т.д. показано, что и в термодинамике физическая модель наблюдаемого явления может быть записана в виде:

$$\beta \cdot d^2t/d\tau^2 + c \cdot m \cdot dt/d\tau + \alpha \cdot t = P \cdot \eta \quad (6)$$

отсюда:

$$\eta = (\beta \cdot d^2t/d\tau^2 + c \cdot m \cdot dt/d\tau + \alpha \cdot t) : P(\tau) \quad , \text{ где} \quad (7)$$

β – мера тепловой инерции, Вт·сек²/°С;

$c \cdot m$ – мера тепловой вязкости среды нагрева, Вт·сек/°С;

α – мера упругости субстанции тепловой энергии, Вт/°С;

Просчитанные в среде MathCAD значения η дало во времени график, неотличимый качественно по виду от полученного экспериментально, т.е. есть основания предположить, что предложенная модель процесса преобразования электрической энергии в тепловую корректна.

Если принять (7) за модель динамики нагрева тела внутренним источником, то из неё следуют следующие важные конструктивные моменты. Во-первых, это то, что при линейном законе изменения температуры тела $v_p = \text{const}$, а $v'_p = 0$, т.е. и $\eta = \text{const}$, что позволяет осуществить оптимизацию. Во-вторых, есть ещё одна функциональная зависимость, при которой $x = x' = x''$, это экспоненциальная функция. Если закон изменения температуры будет экспоненциальный, то и $v_p = \text{exp}$ и $v'_p = \text{exp}$, значит и η не будет осциллировать. Для оптимизации процесса нагрева необходимы аналитические зависимости траекторий t , P и U . В случае экспоненциального закона следует вначале определить вид температурной кривой. Итоговое выражение для температуры имеет вид:

$$t = t_n + (t_n - t_{cp}) \cdot e^{\left[\ln \left| \frac{t_k - t_{cp}}{t_n - t_{cp}} \right| / T \right] \cdot \tau} \quad (8)$$

Выражение для величины электрической мощности, необходимой для реализации режима (8) будет иметь вид:

$$P = \frac{cm}{\eta} \cdot \left[\ln \left| \frac{t_k - t_{cp}}{t_n - t_{cp}} \right| \right] : T \cdot e^{\left[\ln \left| \frac{t_k - t_{cp}}{t_n - t_{cp}} \right| : T \right] \cdot \tau} \cdot (t_n - t_{cp}) \quad (9)$$

То есть для того, чтобы, к.п.д. был максимален, необходимо, чтобы потребляемая мощность была пропорциональна скорости нагрева смеси. Переход к выражению для величины U - напряжения подаваемого на электроды для реализации режима по (9) дает выражение:

$$U = \left\{ \frac{c \cdot m}{\eta} \cdot T^{-1} \cdot \left[\ln \left| \frac{t_{\kappa} - t_{cp}}{t_{\eta} - t_{cp}} \right| \right] \cdot e^{\left[\ln \left| \frac{t_{\kappa} - t_{cp}}{t_{\eta} - t_{cp}} \right| \cdot T \right] \cdot \tau} \cdot (t_{\kappa} - t_{cp}) \cdot \left(\rho_a + \rho_b \frac{t_{\sigma}}{t_{\sigma} + t_{cp} + (t_{\eta} - t_{cp}) e^{\kappa \tau}} \right) \cdot \frac{l}{S} \right\}^{0.5} \quad (10)$$

При линейном законе изменения температуры тела тепловая инерция не должна проявляться, и η не должно осциллировать. Во первых, при этом η должно линейно уменьшаться, так как будет расти температурная разница тела и среды, и, соответственно, теплотери. Во вторых, этот режим является искусственным, следовательно его аппаратурное оформление не проще, чем для экспоненциального. В третьих, он не позволяет управлять величиной η , т.е. увеличивать её, стабилизировать, делать оптимальной, так как в выражениях для \mathbf{t} , \mathbf{P} , \mathbf{U} при линейном законе не входит такой параметр, как температура окружающей среды. При экспоненциальном законе изменения температуры тела по (8) тепловая инерция должна проявиться, но не будет осциллировать, так как $e^{\kappa \tau} = e$ и, соответственно, и η не должно осциллировать, и не должно уменьшаться по ходу разогрева, так как скорость нагрева U_p непрерывно увеличивается, а значит ускорение нагрева постоянно, поэтому тепловая инерция и упругость субстанции тепловой энергии не будут проявляться в виде осцилляции скорости нагрева и величины к.п.д.

Экспериментальная проверка правильности расчетных формул включала сравнение кинетики и абсолютных итоговых значений величины к.п.д. при разогреве на естественном неуправляемом режиме $U = \text{const}$ и при разогреве по предложенным формулам. Также было проведено два разогрева по управляемым режимам по произвольным плавным кривым с траекторией выше и ниже траекторий, описываемых формулами (9) и (10). Это необходимо для того, чтобы исключить элемент случайности в выводах. Результаты всех экспериментов представлены в таблице 1

Таблица.1 Результаты экспериментов по сравнению режимов разогрева

N	m	Δt	ΣQ_i	ΣW_i	η	Примечание.
1	6,545	50	490677	667440	0,735	$U = \text{const}$
2	6,255	49,95	470607	480510	0,980	$t = t_H + k\tau$
3	6,602	50,7	501916	512400	0,980	$t' = k\Delta t$
4	6,250	48,25	454442	546803	0,831	НИЖЕ exp
5	6,350	48,8	467146	491280	0,951	ВЫШЕ exp

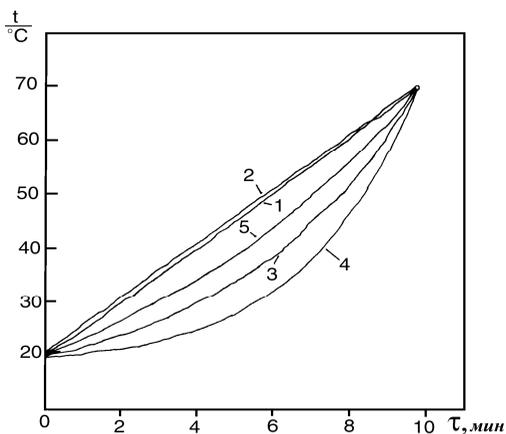


Рисунок 27. Температурные графики эксперимента.

1-5 - режимы нагрева по табл. 1

Из результатов следует:

- управляемый режим вообще эффективнее неуправляемого;
- два оптимальных режима 2 и 3 одинаково эффективны;
- их (2 и 3) эффективность намного больше, чем в неуправляемом разогреве и заметно больше, чем управляемом, но не оптимальном.

В седьмой главе (*Производственная проверка результатов исследований и критерии их коммерциализации*) приводится расчетное обоснование возможного расширения области применения технологии ПЭРБС

на основе повышения ресурса работоспособности электроразогревающих устройств. Возможность повышения среднеобъемной температуры нагрева, даже жесткой бетонной смеси до 85-90 °С, позволяет расширить область применения данной технологии за счет увеличения диапазона модульности конструкций, за счет достижения нормируемой прочности у более широкого класса изделий и конструкций и, самое главное, результаты исследования позволяют решить проблему равномерности температурных полей и на этой основе резко поднять ресурс работоспособности оборудования для ПЭРБС. Это решающий фактор возможной коммерциализации и расширения области применения данной технологии. Приводится технология бетонирования монолитных конструкций и изготовления сборных ж/б изделий с использованием результатов проведенных исследований. Изложены технические решения, рекомендации по расчету, конструированию и эксплуатации энергоэффективных ЭРУ.

Основные выводы по работе

1. Установлено, что причиной неравномерности электрических и тепловых полей в межэлектродном объеме электроразогревающих устройств является краевой эффект, который проявляется резким увеличением напряженности электрического поля E , плотности тока J , тепловыделения w и температуры t на ребре и торце фазного электрода и обусловлен многократно повышенной плотностью электрических зарядов в области ребра, вследствие установившегося равновесия зарядов на всей поверхности электрода.
2. Впервые установлена функциональная зависимость величины к.п.д. в процессе электроразогрева от режима потребляемой мощности. Обоснована необходимость в управлении величиной потребляемой мощности в процессе электроразогрева с целью стабилизации и повышения величины к.п.д..
3. Установлено, что для стабилизации и максимизации величины к.п.д. при любых внешних температурах скорость роста температуры должна быть пропорциональна текущей разности температуры смеси и воздуха, т.е. расти экспоненциально с заданным темпом нагрева. Напряжение и мощность при этом также должны расти экспоненциально. Предложены соответствующие расчетные формулы.
4. Впервые предложена физико-математическая модель, объясняющая синхронную осцилляцию величины скорости электроразогрева смеси и к.п.д. процесса электроразогрева. Раскрыт физический смысл величин тепловой инерции, тепловой вязкости и упругости субстанции тепловой энергии.

5. Установлено, что заглубление торцов фазных электродов в ортогональный диэлектрический корпус устраняет неравномерность \mathbf{J} , $\boldsymbol{\omega}$ и \mathbf{t} полей, что качественного увеличивает ресурс работоспособности электроразогревающихся устройств. Техническая новизна подтверждена патентом RU 2193484.
6. Экспериментально подтверждено, что программный комплекс численного моделирования ELCUT 5.7 адекватно рассчитывает поля \mathbf{U} , \mathbf{E} , \mathbf{J} , $\boldsymbol{\omega}$, \mathbf{t} , \mathbf{G} , \mathbf{F} в бетонной смеси в электроразогревающихся устройствах и позволяет учесть краевые эффекты на ребрах фазных электродов.
7. Установлено с помощью ПК ELCUT 5.7 и подтверждено на практике, что положительный эффект от уменьшения толщины фазных электродов до 0,8 мм происходит вследствие уменьшения теплопроводного сечения металла электрода и теплового потока \mathbf{F} вдоль электрода до 10 раз от периферии к центру. Это дает значение критерия качества $A_p=1,28$. Техническая новизна подтверждена положительным решением о выдаче а.с. по заявке 4713098/24-89.
8. Установлено с помощью ПК ELCUT 5.7 и подтверждено на практике, что уменьшение толщины фазного электрода до 0,8÷1,0 мм и выполнение плоскости корпуса, перпендикулярного фазному электроду из электроизоляционного материала снижает критерий A_p до значения 1. Техническая новизна подтверждена патентом RU 2058895.
9. Установлено, что для исключения возникновения зон локального перегрева бетонной смеси в устройствах для непрерывного электроразогрева бетонной смеси с коаксиальным расположением электродов поверхность внутреннего и внешнего электродов в любом поперечном сечении должна быть ортогональна электроизоляционным элементам, а подачу и выпуск смеси следует осуществлять под прямым углом к продольной оси устройства. Техническая новизна подтверждена патентом RU 2342248 и патентом на полезную модель RU 77571.
10. Впервые предложен и обоснован безразмерный симплекс - A_p (отношение скорости нагрева смеси в области ребра электродов к скорости нагрева смеси средней по объему) как критерий количественной оценки равномерности электротепловых полей, т.е. качества процесса электроразогрева бетонной смеси.
11. Предложена, теоретически и экспериментально обоснована новая методика электротехнического, конструктивного и технологического расчета устройств для электроразогрева бетонной смеси в аналитической и критериальной форме, уменьшающая погрешность с 43-60% до 3-4%.

12. Проведена производственная проверка результатов исследований, определен потенциал коммерциализации этих результатов, установлены экономически обоснованные границы применимости технологии ПЭРБС.

Основные положения диссертации представлены в следующих опубликованных работах:

Научные издания по списку ВАК:

1. Титов М.М. Неравномерность электротепловых полей в разогревающих устройствах// Изв. Вузов. Строительство.- 2008.-№ 10.-С. 51 - 54.
2. Титов М.М. Технология предварительного электроразогрева бетонной смеси с использованием современного оборудования // Изв. Вузов. Строительство.- 2009.-№ 3-4.-С. 56- 62.
3. Титов М.М. Методика электротехнического расчета устройств для технологии электроразогрева бетонной смеси // Вестник ТГАСУ. – 2009. - № 4. – С. 152 – 161.
4. Титов М.М. Использование критериальных зависимостей при проектировании устройств для электроразогрева бетонной смеси// Изв. Вузов. Строительство.- 2010.-№ 10.-С. 32 - 38.
5. Титов М.М. Режим потребляемой мощности и к.п.д. электроразогревающих устройств циклического действия// Вестник ТГАСУ. – 2010. - № 1. – С. 172-186.
7. Титов М.М. Устройства предварительного электроразогрева бетонных смесей / А.И. Гныря, М.М. Титов, С.М. Кузнецов // Экономика железных дорог. -2010. -№ 10. -С. 52 - 59.
8. Титов М.М. Оценка организационно-технологической надежности устройств для электроразогрева бетонных смесей / А.И. Гныря, М.М. Титов, С.М. Кузнецов // Экономика железных дорог. -2010. -№ 11. -С. 55 - 62.
9. Титов М.М. Совершенствование устройств предварительного электроразогрева бетонных смесей./ А.И. Гныря, М.М. Титов, С.М. Кузнецов //Строительные и дорожные машины 2011-№2.-С.22-25.
10. Титов М.М. Имитационные модели для оценки организационно-технологической надежности при производстве бетонных работ / С.М. Кузнецов, М.Ю.Серов, М.М. Титов.//Механизация строительства.-2010.-№8.-С.27-30.
11. Титов М.М. Результаты натурных испытаний строительных машин по времени./Кузнецов С.М.,Кузнецова К.С.,СеровМ.Ю.,Титов М.М./Механизация строительства.-2011.-№6.-С.23-27.

Авторские свидетельства и патенты на изобретения:

12. Электрод для электронагрева токопроводящих смесей. Пол. решение о выдаче а.с. по заявке 4713098/24-89..Титов М.М.,Башаев А.В. , Зельман И.С.
13. Пат. 2058895 РФ. Устройство для электроразогрева бетонной смеси. Бюллетень изобретений 1996 № 24 Титов М.М., Квашнин А.Г., Зубков В.И.
14. Пат. 2008574 РФ. Электрокалорифер . Бюллетень изобретений № 4 от 28.02.94. Титов М.М., Бережной А.Н., Белоусов Б.В., Макаренко Д.Г.
15. Пат. 2193484 РФ. Способ защиты электродов при электроразогреве бетонной смеси. Бюл.№33 от 27.11.2002г. Титов М.М., Куликова Л.В., Рязанов А.В.
16. Пат. РФ № 2342248, МКП В 28 В 17/02. Способ защиты электродов при электроразогреве бетонной смеси / М.М. Титов, И.В. Южаков - Опубл. в БИ 36 от 27.12.08.
17. Патент на полезную модель РФ №77571, МКП В26В 17/02. Устройство для электроизоляции фазных трубчатых электродов / М.М. Титов, И.В. Южаков, С.А. Кулигин. – Опубл. в БИ 30 от 27.10.08.

Международные и всероссийские конференции:

18. Титов М.М. Оборудование для предварительного электроразогрева бетонной смеси на стройках и заводах ЖБИ// Международная н-т конференции. Вузовская наука на международном рынке научно-технической продукции :- Барнаул : 1995. – С.51-52.
19. Титов М.М. Изучение взаимосвязи момента приложения теплового импульса и суточной прочности бетона на электроразогретых смесях/ Титов М.М., Ильюшенко А.С., Савельев В.В., Герасименко А.И.// Международная н-т конференции. Композиты в народное хозяйство России :- Барнаул : 1995 . – С.66-67.
20. Титов М.М. Осцилляция величины к.п.д. в процессе электроразогрева.// Международная научно-техническая конференция. Резервы производства строительных материалов: АГТУ, Барнаул, 1997 – С. 47-49.
21. Титов М.М. Электроконтактный нагрев бетонной смеси в движении// Международная научно-техническая конференция. Синэрго-

- бетонирование изделий и конструкций : ВлГТУ, Владимир , 1998 – С. 27-29.
22. Титов М.М. Явление осцилляции величины к.п.д. в процессе электроразогрева.// Международная научно-техническая конференция. Энергообработка бетонной смеси в строительстве: Владимир, 1996г., -С.35-36.
 23. Титов М.М. Управление потребляемой мощностью для повышения к.п.д. электроразогревающих устройств//Международная научно-техническая конференция. Обобщение теории и практики синэргобетонирования: Владимир, 2002г., -С.23-25
 24. Титов М.М. Методика электротехнического расчета циклических устройств для электроразогрева бетонной смеси// Международная научно-техническая конференция. Обобщение теории и практики синэргобетонирования: Владимир, 2002г., -С.26-29
 25. Титов М.М., Черных И.С./ Новый подход к оценке экономической эффективности зимнего бетонирования / III Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 80 летию НГАСУ, г. Новосибирск, 2010, -С.134-140.
 26. Титов М.М. Проблемы и перспективы технологии предварительного электроразогрева бетонной смеси./ Сб. докладов 12-й Сибирской (междунар.) конф. по бетону и железобетону. Вып. – 2010. – С.87-91

Периодические печатные журналы и издания

27. Титов М.М. Совершенствование оборудования для предварительного электроразогрева бетонной смеси./ Титов М.М., Власов В.А., Рязанов А.В., Южаков И.В. // Проектирование и строительство в Сибири -г. Новосибирск,-2007-№1(37),-С.32-36.
28. Титов М.М. Новое слово в разработке технологии предварительного электроразогрева бетонной смеси./ Гныря А.И.,Титов М.М. //Строительные материалы XXI века.(Технологии бетонов). №1, 2008г. МГАСУ-Москва.-С.54-57.
29. Титов М.М.Оптимизация выбора машин для бетонных работ. / Кузнецов С.М., Титов М.М., Чулкова И.Л.// Механизация строительства. №9,2008г.-С. 17-20.
30. Титов М.М. Управление потребляемой мощностью для повышения к.п.д. электроразогревающих устройств./ Труды годичного собрания РААСН// Москва-Казань-2003г -С.258-262.
31. Титов М.М. . Совершенствование устройств для предварительного электроразогрева бетонных смесей./ А.И. Гныря, М.М. Титов, С.М. Кузнецов ./Механизация строительства.-2010.-№12.-С.7-11.

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

Прочие публикации:

33. Титов М.М. Использование микроЭВМ для определения электрофизических параметров бетонной смеси. Совершенствование технологии бетонных работ и интенсификации использования техники. Сборник научных трудов /Под ред. А.С. Арбеньева. Владимирский политехнический институт – Владимир: рот-нт ВПИ, 1990. С. 57-58
34. Титов М.М. Электроды для предварительного электроразогрева бетонной смеси. Резервы производства строительных материалов . Межвузовский сборник / Под редакцией В.К.Козловой. АПИ. – Барнаул : рот-нт АлтПИ, 1988. – С.137-140.
35. Титов М.М. Безразмерный критерий качества процесса электроразогрева. Непрерывный элетроразогрев бетонной смеси в строительстве. Материалы совещания-семинара. – Ленинград : 1991. – С.15-17
36. Титов М.М., Курицкий А.М. Кинетика к.п.д. процесса элетроразогрева бетонной смеси. Совершенствование технологии и организации строительного производства : Сборник статей / Под ред. А.И.Гныри. – Томск : Издательство Томского университета . 1985. – С.76-82.
37. Титов М.М., Кандаурова Н.М. Место и возможности технологии циклического электроразогрева в современных условиях./ Сборник трудов 54 научно-технической конференции НГАС, Новосибирск, 1997 г. –С.23-25.
38. Титов М.М., Ковалев Е.В. Влияние электрофизических эффектов на работу электродных групп ЭРУ. Сборник трудов 56 научно-технической конференции АлтГТУ, Барнаул, 1998 г.- С. 43-46.
39. Титов М.М. Электротехнический расчет бункеров для электроразогрева бетонной смеси. Перспективные строительные конструкции и технологии . Сборник научных трудов. Выпуск 2. АлтГТУ, Барнаул, 1998 г.- С. 58-62.
40. Титов М.М. Энергетическая эффективность работы электроразогревающих устройств. Перспективные строительные конструкции и технологии . Сборник научных трудов. Выпуск 2. АлтГТУ , Барнаул, 1998 г.- С.63-67.

Титов Михаил Михайлович

**Развитие научных основ совершенствования процесса электрора-
зогрева бетонной смеси в технологии зимнего бетонирования**

АВТОРЕФЕРАТ

Изд. лиц. № 021253 от 31.10.97 .

Подписано в печать 05.2011. Формат 60×84 1/16

Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Усл.-печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,65.

Тираж 120 экз. Заказ №

Изд-во ГОУ ВПО «ТГАСУ», 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Отпечатано с оригинала-макета автора в ООП ГОУ ВПО «ТГАСУ».

634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.