

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Ивановский государственный политехнический университет»

На правах рукописи

Красносельских Николай Валерьевич

**ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ИЗДЕЛИЙ ТОКАМИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ
СБОРНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА**

Специальность:

05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы (строительство)»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Академик РААСН, д.т.н., проф.
Сергей Викторович Федосов

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

Иваново 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение.....	4
1 Современное состояние и проблемы развития электротепловой обработки бетона в строительной отрасли.....	17
1.1 Методы и проблемы тепловой обработки бетона и железобетонных изделий	17
1.2 Методы электротепловой (электротермической) обработки железобетонных изделий	20
1.3 Перспективные направления научно-технического прогресса по электротепловой обработке на предприятиях сборного железобетона	28
1.4 Параметры тепловой обработки железобетонных изделий	36
1.5 Выводы, цель и задачи диссертационного исследования	40
2 Разработка методов расчета температурных полей в объеме железобетонных изделий в процессе электротепловой обработки ..	44
2.1 Методика расчета температурного поля при неоднородном тепловыделении в объеме материала	44
2.2 Обоснование принципа расчета температурного поля в трехмерном пространстве на основе суперпозиции градиентов температуры	51
2.3 Методика численно-аналитического расчета процесса теплопередачи и стационарного температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонного изделия при его электротепловой обработке	55
2.4 Особенности практического применения расчетных методик	67
2.5 Выводы по гл. 2.....	73
3 Исследование параметров и характеристик электротепловой обработки при изготовлении железобетонных изделий теоретическими методами	75
3.1 Исследование характеристик температурного поля в объеме обрабатываемого железобетонного изделия в процессе ЭТО при неоднородном тепловыделении	75
3.2 Программно-алгоритмическая реализация методики расчета характеристик температурного поля в трехмерном пространстве объема обрабатываемого железобетонного изделия в процессе ЭТО	78
3.3 Исследование характеристик температурного поля в трехмерном пространстве объема обрабатываемого железобетонного изделия в процессе ЭТО	83

3.4	Исследование градиентов температурного поля в трехмерном пространстве объема обрабатываемого железобетонного изделия в процессе ЭТО	95
3.5	Определение влияния характеристик температурного поля в трехмерном пространстве объема обрабатываемого железобетонного изделия на показатели процесса ЭТО железобетонных изделий	104
3.6	Выводы по главе 3	113
4	Разработка опытно-промышленных установок для изготовления железобетонных изделий с применением электротепловой обработки токами повышенной частоты	116
4.1	Выбор и обоснование вариантов опытно-промышленных установок для изготовления железобетонных изделий с применением ЭТО электродным методом токами повышенной частоты	116
4.2	Разработка опалубки (оснастки) опытно-промышленных установок для изготовления железобетонных изделий с применением ЭТО	120
4.3	Разработка полупроводниковых источников питания опытно-промышленных установок для изготовления железобетонных изделий с применением ЭТО	133
4.4	Методика проведения экспериментов на опытно-промышленных установках для изготовления железобетонных изделий с применением ЭТО	139
4.5	Выводы по гл. 4.....	144
5	Результаты экспериментальных исследований процессов ЭТО на опытно-промышленных установках	146
5.1	Порядок проведения экспериментальных исследований опытно-промышленных установок	146
5.2	Исследование временных характеристик процесса ЭТО при изготовлении железобетонных изделий на опытно-промышленных установках	155
5.3	Характеристики температурного поля в объеме железобетонных изделий в процессе их изготовления на опытно-промышленных установках	163
5.4	Энергетические и стоимостные показатели процесса ЭТО железобетонных изделий на опытно-промышленных установках ...	171
5.5	Выводы по главе 5	178
	Заключение	181
	Список литературы.....	183
	Приложение.....	200

Введение

Глубокая модернизация экономики в целях значительного повышения эффективности и конкурентоспособности отечественного промышленного производства является одним из основных направлений государственной политики Российской Федерации. Строительная отрасль представляет собой яркий пример необходимости проведения такой модернизации. Наиболее важной задачей в сфере технологических процессов строительной индустрии является снижение их энергоёмкости. Это объясняется наличием в составе таких процессов этапов, на которых требуется термическое воздействие на материалы, например, в устройствах по разогреву бетонных смесей и тепловой обработке железобетонных изделий. К настоящему времени основное применение для этого получила тепловлажностная обработка (ТВО) водяным паром [1-7]. Такой способ теплового воздействия на бетон железобетонные изделия является технически наиболее простым, но обладает рядом серьезных недостатков [4-10]: например, изделие воспринимает лишь малую долю энергии пара, что значительно снижает технико-экономические показатели производственного процесса. Другими недостатками являются трудности с гибким регулированием потребления пара в зависимости от потребностей производства и сезонных условий, высокая стоимость пропарочных камер. Это явилось причиной появления большого количества научно-технических разработок, направленных на устранение преодоление указанных недостатков, однако возможности повышения эффективности ТВО к настоящему времени практически исчерпаны [4-17]. Такой же низкой энергетической эффективностью обладают и другие методы тепловой обработки бетона, получившие уже достаточно широкое распространение, - это обработка продуктами сгорания природного газа и подогрев опалубки горячей водой [4-7,18-23]. Однако для южных и солнечных районов весьма целесообразной и выгодной является тепловая обработка железобетонных изделий с помощью солнечной энергии [4-7,23-32].

В настоящее время тепловая обработка бетона и железобетонных изделий в условиях российского климата является обязательной стадией технологического процесса в строительной индустрии. Такой обработке при изготовлении подвергается около 90% железобетонных конструкций и изделий (около 20 000 тыс. куб.м в России ежегодно) [1,4-7,10,33-41]. Эта обработка обеспечивает значительное ускорение процесса роста механической прочности бетона и позволяет многократно повысить производительность и технико-экономические показатели производственного процесса предприятий сборного железобетона.

Ряд известных исследователей и специалистов (Б.А. Крылов, Ю.М. Баженов, В.М. Бондаренко, С.М. Трембицкий, А.С. Арбенев, С.В. Федосов, Н.Ф. Афанасьев, Н.Г. Пшонкин и др.) сходятся во мнении, что одним из наиболее перспективных направлений научно-технического прогресса строительной отрасли, позволяющее существенно повысить энергетическую эффективность технологического процесса, является широкое применение электротепловой (электротермической) обработки бетона и железобетонных изделий [1,4-7,14,35,38]. Главное достоинство электротепловой обработки – её высокая энергетическая эффективность, которая теоретически приближается к 100 %. Существуют и применяются различные методы такой обработки, и наиболее перспективным считается электродный метод, когда нагрев изделия происходит вследствие протекания электрического тока в толще бетона [1]. Он является наиболее простым, дешевым, эффективным и имеет самый высокий коэффициент полезного действия, превышающий почти на порядок аналогичный показатель традиционных методов.

Эти обстоятельства стали причиной того, что в последние годы были выполнены научно-технические исследования по разработке и применению процессов электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты с помощью источников питания нового поколения, выполненных на основе полупроводниковых (транзисторных) преобразователей частоты. Благодаря предпринятым усилиям к настоящему времени достигнут значительный прогресс в вопросах теории и практики такой электротепловой

обработки. Выполненные исследования подтвердили высокую эффективность электротепловой обработки бетона токами повышенной частоты электродным методом. Такую обработку можно с одинаковым успехом применять, как в производственных условиях гигантов строительной индустрии, так и в условиях малых предприятий, которые испытывают острую потребность в применении электроразогрева бетона и которым традиционные методы тепловой обработки либо недоступны, либо невыгодны.

В настоящее время актуальной является задача создания опытно-промышленных установок для изготовления реальных железобетонных изделий с применением электротепловой обработки токами повышенной частоты, а также проведение всесторонних исследований характеристик процессов электротепловой обработки токами повышенной частоты с использованием этих установок в целях накопления опыта и разработки рекомендаций по широкому применению таких процессов на практике. Одновременно, требуют дальнейшего развития и совершенствования некоторые вопросы теории общей методологии создания и применения процессов электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты. В частности, существует острая потребность в разработке инженерных методов расчета характеристик температурных полей в объеме обрабатываемых изделий, без знания которых невозможно квалифицированно разрабатывать и применять процессы такой электротепловой обработки.

Обязательным элементом электротехнологической установки для электротепловой обработки бетона является источник питания, который служит для того, чтобы обеспечить ее бесперебойное электроснабжение. Перспективным техническим решением является применение для электротепловой обработки бетона источников питания нового поколения, выполненных на основе полупроводниковых преобразователей напряжения с использованием новых силовых электронных компонентов в виде мощных высоковольтных транзисторов, появившихся на рынке последние 7÷8 лет. Такие источники питания благодаря высокой частоте выходного напряжения (10-20 кГц) имеют,

как минимум, на порядок лучшие массогабаритные показатели, а также меньшую стоимость, чем традиционные трансформаторные источники 50 Гц. Это обусловило целесообразность применения таких источников питания на предприятиях сборного железобетона для осуществления электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты.

Целью настоящей работы – разработка процессов ЭТО железобетонных изделий электродным методом токами повышенной частоты, а также необходимого оборудования для производственного применения на основе дальнейшего развития и совершенствования элементов общей методологии создания и применения таких процессов.

Поставленная цель требует решения следующих задач.

1. Разработать методику расчета характеристик стационарного температурного поля в объеме железобетонного изделия при неоднородном тепловыделении в процессе ЭТО.

2. Необходимо сформулировать и обосновать порядок применения принципа суперпозиции при расчете характеристик температурного поля в объеме железобетонного изделия в ходе его электротепловой обработки.

3. Разработать инженерную методику численно-аналитического расчета процесса теплопереноса и стационарного температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонного изделия при его электротепловой обработке на основе предложенного принципа суперпозиции градиентов температуры.

4. Выполнить с помощью этой методики исследования характеристик такого поля применительно к реальным изделиям в целях создания опытно-промышленных установок для производства таких изделий и разработки процесса ЭТО токами повышенной частоты.

5. Составить и обосновать перечень вариантов опытно-промышленной реализации изготовления железобетонных изделий с помощью ЭТО, обеспечить разработку и изготовление опытно-промышленных установок, выполнить

экспериментальные исследования характеристик процесса ЭТО токами повышенной частоты в производственных условиях.

Объект исследования. Технологический процесс изготовления железобетонных изделий на предприятиях сборного железобетона и крупнопанельного домостроения.

Предмет исследования. Процесс изготовления железобетонных изделий с использованием их разогрева электрическим током повышенной частоты, протекающим через бетон.

Теоретическая и методологическая основа исследования. Теоретической базой выполненной диссертации являются современные представления о закономерностях тепломассопереноса, теории электрического поля в материале, химических процессов гидратации цемента, механического разрушения и прочности бетона, представления о возникновении объёмно-напряженного состояния в материале, современные методы оценки технико-экономических показателей производственных процессов, а также существующие представления и разработки в вопросах методологии исследования различных характеристик и технико-экономических показателей тепловой и электротепловой обработки бетона и железобетонных изделий. Для решения задач в работе использовались физические, математические и статистические методы исследования.

Научная новизна.

1. Предложен и обоснован принцип расчета температурного поля в трехмерном пространстве, на основе суперпозиции градиентов температуры и интегрировании функции изменения градиента температуры в пространстве.
2. Разработана методика численно-аналитического расчета процесса теплопередачи и стационарного температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонного изделия при его электротепловой обработке на основе предложенного принципа вычисления температуры.
3. Решена задача одномерного теплопереноса с определением распределения температуры и градиента температуры при неоднородном тепловыделении в объеме материала; доказано, что управлением законом изменения

тепловыделения в пространстве можно достичь более однородного температурного поля и снижения температурного градиента по сравнению характеристиками при однородном тепловыделении.

4. Усовершенствована методика оценки опасности градиентов температуры посредством приведения предельно допустимых и фактических значений этих параметров к одинаковым (базовым) условиям.

5. Обнаружено явление существенного увеличения энергетической эффективности ЭТО токами повышенной частоты с достижением КПД процесса выше 100 % за счет тепла гидратации цемента в случае использования оборудования (опалубки) рациональной конструкции.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

Теоретическая значимость работы состоит в дальнейшем совершенствовании методологии создания и применения процессов ЭТО в форме разработки численно-аналитического расчета процесса теплопереноса и стационарного температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонного изделия при его электротепловой обработке на основе предложенного принципа суперпозиции существующей, теории тепломассопереноса и теории электрического поля. Практическая значимость заключается в том, что полученные результаты доказывают возможность и высокую эффективность применения ЭТО бетона и железобетонных изделий токами повышенной частоты на предприятиях сборного железобетона, а разработанные, изготовленные и использованные в настоящей работе опытно-промышленные установки для изготовления железобетонных изделий с помощью ЭТО токами повышенной частоты уже пригодны для промышленного применения, а также являются основой для разработки более совершенных видов оборудования и технологические процессы такого типа.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Полученные научные положения и выводы, приведенные в работе, основаны на результатах многолетних экспериментов, выполненных преимущественно в производственных условиях с применением современных методов исследований,

и их статистической обработки, подтверждены сходимостью результатов компьютерного моделирования и результатов эксперимента, а так же их корреляцией с известными закономерностями.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно поставлены цели и задачи, выбраны объекты и методы исследований, разработана программа теоретических и экспериментальных изысканий, разработана конструкция опытно-промышленных установок и обеспечено 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.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенные теоретические разработки, представляющие собой удобный и эффективный инструмент создания и применения процессов ЭТО при изготовлении реальных железобетонных изделий.
2. Результаты теоретических исследований характеристик процесса ЭТО различных железобетонных изделий.
3. Особенности конструктивного выполнения и характеристики опытно-промышленных установок для изготовления железобетонных изделий с помощью ЭТО токами повышенной частоты.
4. Результаты экспериментальных исследований процесса изготовления железобетонных изделий с использованием ЭТО токами повышенной частоты в производственных условиях.

Структура диссертации обусловлена целью и задачами, решаемыми в работе. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложения.

В главе 1 показано, что тепловая обработка является обязательной составной частью технологического процесса изготовления железобетонных изделий на

предприятиях сборного железобетона и крупнопанельного домостроения [1,4-7], т.к. обеспечивает высокие технико-экономические показатели производственного процесса. Наиболее распространённым и традиционным способом тепловой обработки железобетонных изделий является тепловлажностная обработка водяным паром (ТВО) [4-7]. Такая обработка имеет некоторые неоспоримые преимущества, но обладает очень серьёзными недостатками – например, низкой энергетической эффективностью: бетон воспринимает всего 8-12% энергии пара, а случае ячеистых бетонов, обладающих низкой теплопроводностью, это показатель не превышает 5% [4-11,14]. Распространённой является тепловая обработка продуктами сгорания природного газа, но и она имеет приблизительно такую же энергетическую эффективность, как и ТВО [18-21]. Немногим лучше является ещё один традиционный метод – обогрев опалубки горячей водой [22,23]. Важнейшим недостатком перечисленных методов является то, что передача тепла происходит с поверхности внутрь изделия, в котором из-за низкой теплопроводности бетона возникают неравномерные температурные поля (градиенты температуры), приводящие к снижению механической прочности материала и качества изделий. Ведущие исследователи и специалисты строительной отрасли сходятся во мнении, что перспективным способом преодоления указанных недостатков является широкое применение электротепловой обработки (ЭТО) бетона и железобетонных изделий в сочетании или вместо традиционных способов тепловой обработки [1,4-7,10,33,35,38]. Важнейшее достоинство ЭТО – её высокая энергетическая эффективность, теоретически приближающаяся к 100%, особенно при использовании электродного метода нагрева (т.е. проходящим через бетон электрическим током). Он обеспечивает также наиболее однородное выделение тепла по всему объёму вещества. В результате снижается неоднородность температурных полей внутри изделия и её вредные последствия. Несмотря на свои явные преимущества ЭТО, применяется, в основном, в тех случаях, когда без неё нельзя обойтись, например, в монолитном (сборно-монолитном) строительстве и при зимнем бетонировании. Важнейшим препятствием на пути широкого применения

электротепловой обработки на предприятиях сборного железобетона и крупнопанельного домостроения являются значительные массогабаритные показатели существующих трансформаторных источников питания промышленной частоты, применяемых в установках такого назначения. Отмечено, что эффективным способом устранения этого препятствия является применение для ЭТО источников питания нового поколения, выполненных на основе полупроводниковых (транзисторных) преобразователей напряжения большой мощности. Такие источники питания имеют выходное несинусоидальное напряжение повышенной частоты (10-20 кГц), и, как следствие, значительно лучшие массогабаритные, технико-экономические и эксплуатационные показатели. Другой причиной отсутствия ЭТО на предприятиях сборного железобетона является недостаточный уровень разработки вопросов теории процессов ЭТО.

Указанные обстоятельства явились причиной проведения в последние годы достаточно обширных научно-технических исследований и разработок по применению ЭТО токами повышенной частоты. Достигнут значительный прогресс в вопросах теории ЭТО: разработана общая методология создания и применения процессов ЭТО, которая базируется на решении феноменологических дифференциальных уравнений тепломассопереноса при наличии источника тепла в объеме материала, мощность которого определяется решением уравнений электрического поля в материале с комплексной (активно-ёмкостной) электрической проводимостью в сочетании с использованием целого ряда дополнительных теоретических моделей и расчётных методов.

Центральное место в этой методологии занимает процедура расчета характеристик температурного поля в объеме железобетонного изделия в ходе ЭТО. Поэтому в настоящее время существует задача создания библиотеки и накопления в ее составе методов и методик расчета таких характеристик применительно реальным ситуациям, что обеспечить благоприятные условия широкого распространения ЭТО токами повышенной частоты на предприятиях сборного железобетона. В частности, актуальной является задача разработки

достаточно простой инженерной методики расчета характеристик температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонных изделий в ходе их электротепловой обработки. Неслучайно, что вопросы тепло- массопереноса остаются в поле зрения ведущих специалистов на протяжении длительного периода времени (А.В. Лыков, С.П. Рудобашта, С.В. Федосов, В.С. Грызлов и др.)

Выполненные эксперименты в лабораторных и производственных условиях позволили проверить адекватность общего методологического подхода и предложенных математических моделей, а также подтвердили возможность и целесообразность использования электротепловой обработки бетона токами повышенной частоты при изготовлении бетонных и железобетонных изделий. Замена традиционной ТВО на ЭТО приводит к снижению стоимости технологического процесса в среднем на 25 % и добиться такого же результата другими средствами практически невозможно.

Вполне очевидно, что масштабному внедрению ЭТО токами повышенной частоты на предприятиях сборного железобетона должны предшествовать создание, исследование и эксплуатация опытно-промышленных установок такого назначения на основе дальнейшего развития и совершенствования методологии разработки и применения ЭТО токами повышенной частоты, особенно, в части расчета характеристик температурного поля в объеме материала обрабатываемого изделия в ходе его ЭТО.

На основе анализа сведений, приведенных в главе 1, были сформулированы цель и задачи настоящей работы.

Глава 2. В этой главе приведено решение задачи одномерного теплопереноса при неоднородном тепловыделении в направлении теплового потока при выполнении ЭТО с определением закона изменения температуры и градиента температуры в этом направлении. Задача решена для двух вариантов характера изменения объемной плотности тепловыделения: когда этот параметр убывает по линейному закону и когда по такому же закону убывает напряженность электрического поля. Эти варианты в достаточной мере исчерпывают практические случаи теплопереноса с неоднородным тепловыделением при

осуществлении ЭТО. Однако основное внимание было уделено созданию инженерной методики численно-аналитического расчета процесса теплопереноса и стационарного температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонного изделия, подвергающихся ЭТО электродным методом. Для построения такой методики предложен и обоснован принцип расчета температурного поля в трехмерном пространстве на основе суперпозиции градиентов температуры и интегрировании функции его изменения в пространстве. Реализация численно-аналитической методики расчета температурного поля в трехмерном пространстве показана на примере объекта в виде параллелепипеда, который представляет собой либо реальное изделие, например фундаментный блок, либо мысленно вырезанной его частью. На основании предложенной численно-аналитической методики расчета параметров температурного поля в трехмерном пространстве разработана ее программно-аналитическая реализация, которая в виде блок-схемы представлена в работе. С помощью этой блок-схемы составлены расчетные программы в среде MATLAB.

Глава 3 посвящена всестороннему исследованию характеристик температурных полей в объеме материала железобетонного изделия в ходе его электротепловой обработки электродным методом с помощью расчетных методик, представленных в настоящей работе. Дано описание программно-алгоритмической реализации методики расчета температурного поля в трехмерном пространстве (гл. 2) в среде MATLAB. Выполненные теоретические исследования показывают, что использование ЭТО при изготовлении железобетонных изделий обеспечивает существенно более высокую однородность температурного поля, чем при применении традиционных методов тепловой обработки (например, ТВО), однако даже в этом случае принципиально невозможно добиться абсолютно однородного температурного поля, а правильной и реальной постановкой задачи следует считать получение такой неоднородности, при которой не будет возникать опасных ситуаций для обрабатываемого изделия. Показано, что, вопреки распространённому мнению, однородное выделение тепла в объеме материала является далеко не самым

лучшим вариантом электротермической обработки, и значительно более однородное температурное поле в стационарном режиме достигается в том случае, если имеет место снижение объёмной плотности мощности в направлении распространения теплового потока. Эффективными средствами управления неоднородностью температурного поля в процессе ЭТО являются изменение распределения электрического поля в объеме материала изделия и параметров теплоизоляционного слоя на поверхности опалубки. На основании выполненных теоретических исследований рекомендуется в общем случае применять теплоизоляцию (пенопласт) на поверхности опалубки толщиной $H_{II} = 4 - 6$ см. Выполненные теоретические исследования позволили оценить допустимые параметры стадии нагревания (скорость подъема температуры не более $6 \div 8$ °С при конечной температуре нагрева $45 \div 48$ °С), при соблюдении которых устраняется опасность повреждения материала изделия внутренними механическими напряжениями, вызванными наличием градиентов температуры. Убедительно показано, что предложенная программно-алгоритмическая реализация методики расчета температурного поля в трехмерном пространстве (разд. 2.3) в среде MATLAB представляет собой удобный, достаточно универсальный и эффективный инструмент исследования температурных полей в объеме железобетонных изделий в процессе их изготовления с применением ЭТО токами повышенной частоты в целях создания необходимого оборудования и выбора режимов процесса ЭТО. Этот инструмент доступен широкому кругу пользователей, что выгодно отличает его от существующих сложных численных методов расчета температурных полей (например, метод конечных элементов).

В главе 4 рассматриваются вопросы разработки опытно-промышленных установок для изготовления широко распространенных железобетонных изделий с применением электротепловой обработки токами повышенной частоты, а также методики проведения экспериментальных исследований с использованием этих установок на основе результатов теоретических исследований (гл. 3). Разработанное и изготовленное оборудование имеет относительно простые конструкции и схемотехнические решения. Опалубка выполняется из

ламинированной фанеры 2 см с деревянным каркасом (брус 5x10 см), теплоизоляцией (пенопласт 5 см) и обшивкой (фанера 4 мм). Описана методика проведения экспериментов с использованием ЭТО токами повышенной частоты. В ходе всех экспериментов предусмотрена регистрация электрических параметров процесса, осциллографирование напряжения на электродах опалубки и на электродах зонда для измерения напряженности электрического поля в бетоне в ходе ЭТО, измерение температуры в различных точках объема материала и окружающего воздуха. После завершения ЭТО, охлаждения и распалубки изделия производится периодическое измерение предела прочности на сжатие бетона неразрушающим методом.

В главе 5 приведены результаты экспериментальных исследований показателей и характеристик электротепловой обработки железобетонных изделий в производственных условиях с использованием опытно-промышленных установок. Обширный экспериментальный материал, полученный в настоящей работе, свидетельствует о достоверности предложенных в работе теоретических разработок. Результаты экспериментов в производственных условиях с использованием разработанных опытно-промышленных установок убедительно подтверждают целесообразность и возможность широкого применения процессов ЭТО токами повышенной частоты электродным методом на предприятиях сборного железобетона. Например удельные затраты энергии на выполнение тепловой обработки таким способом снижаются по сравнению с традиционной ТВО в 12÷30 раз, а ее стоимость в 6÷16 раз. Кроме этого, впервые обнаружено явление, когда энергетическая эффективность (КПД) процесса ЭТО токами повышенной частоты может превышать 100% благодаря эффективному использованию тепла гидратации цемента. Разработанное, изготовленное и испытанное в ходе выполнения настоящей работы опытно-промышленное оборудование полностью подтвердило свою работоспособность и уже практически пригодно для промышленного, серийного производства железобетонных изделий.

Глава 1. Современное состояние и проблемы развития электротепловой обработки бетона в строительной отрасли

1.1. Методы и проблемы тепловой обработки бетона и железобетонных изделий

При производстве железобетонных изделий различного назначения на предприятиях сборного железобетона широко применяют различные методы тепловой обработки этих изделий в целях значительного ускорения твердения бетонной смеси и повышения производительности технологического процесса. Например, в случае использования тепловой обработки важнейший показатель бетона – его предел прочности при сжатии – уже через сутки достигает величины не ниже 70% от нормированной прочности, что в большинстве случаев позволяет производить распалубку готовых изделий [4-7]. В случае твердения бетона при комнатной температуре такая прочность достигается не ранее, чем на 10-11 суток после приготовления и укладки бетона. Поэтому применение тепловой обработки на практике приводит к многократному повышению производительности и технико-экономических показателей технологического процесса. Попутно достигаются другие положительные результаты: повышается механическая прочность бетона, его водостойкость, стабильность характеристик во времени, снижается потребность в необходимых производственных площадях (по сравнению с твердением при комнатной температуре) и др.

При тепловой обработке обычно производится нагрев исходных компонентов или готовой бетонной смеси (до или после формования изделия) до температуры порядка 50-80°C – предварительный разогрев, затем изделие выдерживается при этой температуре и твердеет в течение определённого времени – изотермическая стадия. После этого оно постепенно охлаждается и проходит следующие стадии технологического процесса.

Наиболее распространённым и традиционным способом тепловой обработки железобетонных изделий является тепловлажностная обработка водяным паром (ТВО) в пропарочных камерах [4-10]. При такой технологии опалубка, с заложённой в неё бетонной смесью, постепенно перемещается (как правило в горизонтальном положении) вдоль камеры, в которую подаётся пар, или находится в ней в течение определённого времени (до нескольких часов). После выхода из камеры изделие охлаждается и освобождается от опалубки. В этом случае стадия предварительного разогрева и изотермическая стадия осуществляются в одном устройстве - пропарочной камере. Серьёзным недостатком такой технологии являются большие размеры пропарочной камеры (до 10 м в поперечном сечении и свыше 100 м в длину). Значительно более компактной является установка для ТВО в кассетно-конвейерной технологии изготовления железобетонных изделий [11]. Уменьшение размеров достигается тем, что формы с изделиями собраны в пакет и расположены вертикально практически вплотную друг к другу. В одной камере обрабатывается большое количество изделий при почти одинаковых условиях прогрева. Кассетно-конвейерная технология для обеспечения высокой (расчётной) производительности требует применения предварительного разогрева бетонной смеси перед закладкой в формы, который может производиться, например, с помощью парового [12] или электрического [13] прогрева в бункере. При этом в пропарочной камере осуществляется только изотермическая стадия обработки. Благодаря отмеченным обстоятельствам кассетно-конвейерная технология отличается заметно меньшим расходом пара и более экономичным использованием его энергии в расчёте на м³ готового железобетона.

Важнейшим преимуществом ТВО железобетонных изделий является то, что бетонная смесь не теряет влагу в процессе тепловой обработки. Такие влагопотери могут приводить к снижению качества готовых изделий [4-10].

Главным и серьёзным недостатком ТВО является низкая эффективность использования энергии пара, т.к. бетоном воспринимается всего 8-12 % этой энергии, а случае ячеистых бетонов, обладающих низкой теплопроводностью,

это показатель не превышает 5% [4-11,14]. При этом передача тепла происходит с поверхности внутрь изделия, в котором из-за низкой теплопроводности бетона возникают неравномерные температурные поля, приводящие к снижению качества изделий и увеличению длительности стадии предварительного разогрева. Другим недостатком являются трудности с гибким регулированием потребления пара в зависимости от потребностей производства и сезонных условий. Эти проблемы побуждают разработчиков и исследователей применять различные меры повышения эффективности ТВО [8,10,15-17]. Однако возможности в этом направлении в значительной мере исчерпаны, и, в настоящее время большее внимание уделяется созданию новых методов тепловой обработки.

Перспективной и получившей уже достаточно широкое распространение считается тепловая обработка продуктами сгорания природного газа [18-21].

Преимуществами такой обработки являются более низкая стоимость и значительные ресурсы природного газа, а также возможности гибкого управления технологическим процессом. Вместе с тем, эффективность использования тепловой энергии продуктов сгорания газа невелика (приблизительно такая же, как при обработке паром). Серьезным недостатком тепловой обработки продуктами сгорания газа являются значительные влагопотери бетона за счет испарения воды в процессе тепловой обработки. Это приводит к снижению качества готовых изделий и браку. Указанный недостаток устраняется предварительным нанесением на поверхность изделий тонких пленок, препятствующих испарению влаги в процессе тепловой обработки [20], или разработкой и реализацией специальных мер по управлению влажностью в пропарочной камере [21], что усложняет технологию и требует применения специальных материалов.

К настоящему времени достаточно широкое распространение получила тепловая обработка посредством обогрева опалубки горячей водой. Наиболее часто этот метод применяется при изготовлении изделий большой длины (до 100) по безопалубочной технологии (пустотные плиты перекрытий, забивные сваи,

перемычки и др.) с предварительным напряжением арматуры с последующей разделкой на изделия требуемой длины [22,23].

Общим недостатком всех традиционных методов тепловой обработки железобетонных изделий является то, что они недоступны и экономически невыгодны предприятиям малого и среднего бизнеса.

Для южных и солнечных районов весьма перспективной является тепловая обработка железобетонных изделий с использованием солнечной энергии [24-31]. Эта энергосберегающая, экологически чистая технология в настоящее время имеет различные варианты технической реализации (гелиополигоны, гелиообработка в кассетах и пакетах, с конвективным и инфракрасным обогревом) и применяется в странах ближнего востока и среднеазиатских республиках, а также в некоторых южных районах средней полосы [26-32]. Однако, и в случае гелиообработки приходится применять меры для устранения чрезмерного испарения воды из бетона, например, с помощью предварительного нанесения на поверхность изделий пленкообразующих составов, задерживающих влагу или посредством выполнения такой обработки в гидроаэроциркуляционных гелиокамерах [30-32].

Как показывает анализ литературных источников, значительные усилия разработчиков и исследователей в настоящее время сконцентрированы на создании и освоении различных методов электротепловой (электротермической) обработки железобетонных изделий. При этом электроразогрев бетонной смеси часто рассматривается, как наиболее эффективный способ тепловой обработки железобетонных изделий [1,33-35].

1.2. Методы электротепловой (электротермической) обработки железобетонных изделий

Основным преимуществом тепловой обработки железобетонных изделий электрическими методами является высокая эффективность использования

энергии электричества. Изделия воспринимают практически всю подводимую электрическую энергию за вычетом теплотерь с поверхности изделия, доля которых, как правило, не превышает 10÷15%. Поэтому, несмотря на относительно высокую стоимость электрической энергии, электроразогрев оказывается в 3-5 раз дешевле тепловой обработки паром [33-41].

Наиболее простым (а поэтому и наиболее распространенным) способом тепловой обработки электрическим током является электрообогрев с помощью низкотемпературных электронагревателей различной конструкции, устанавливаемых снаружи обрабатываемого изделия [1,39-53]. Такие нагреватели изготавливаются из материалов высокого сопротивления (нихрома) в виде провода (полос), из углеграфитовой ткани, в виде полимерных токопроводящих покрытий и т.д. Нагреватели выполняются в виде плоских панелей из асбоцемента или композиционных материалов и в виде гибких матов. Снаружи они снабжены теплоизоляцией с целью устранения бесполезных потерь энергии в окружающую среду. При тепловой обработке эти нагреватели накладываются на поверхность изделия или формы (опалубки) либо постоянно закреплены в элементах формы (опалубки), в отсеках между формами (в кассетно-конвейерных установках). Предложены и испытаны нагреватели опалубки индукционного действия [54,55], которые более безопасны в обращении из-за отсутствия электрического контакта нагревателя с источником питания. Такие нагреватели могут применяться на всех или отдельных стадиях тепловой обработки.

Поверхностный электроразогрев может производиться также с помощью высокотемпературных нагревателей инфракрасного излучения с обязательной защитой открытых поверхностей бетона от потерь влаги. Применение этого метода требует внимательного контроля температуры обогреваемой поверхности, которая не должна превышать 80-90 °С [1].

Несмотря на достаточно высокую эффективность и простоту, такой способ электроразогрева не позволяет избавиться от важного недостатка, присущего традиционным неэлектрическим способам обработки (ТВО паром, продуктами

сгорания газа, подогрев опалубки горячей водой, солнечной энергией) и состоящего в том, что тепло поступает внутрь изделия с поверхности (неравномерные температурные поля).

С целью устранения этого недостатка были разработаны и используются в настоящее время технологические процессы электроразогрева с применением закладных нагревательных элементов. Так как эти нагреватели располагаются и остаются в толще железобетонных изделий и не должны вносить неоднородности в конструкцию этого изделия во избежание снижения качества, они изготавливаются из бетона с повышенной электропроводностью [56-63]. Такой бетон получают добавлением электропроводящих компонентов: сажи, графита, каменноугольного кокса, проводящих волокон.

Благодаря оптимизации состава материала средствами математического и физического моделирования разработана технология производства электропроводящего бетона с заданными электропроводностью, прочностью, и высокой стабильностью параметров во времени. Попутно были найдены другие области применения электропроводящего бетона: изготовление нагревателей для обогрева жилых и производственных помещений, использование электропроводящего фундамента в качестве заземляющего устройства, здание из такого бетона представляет собой электромагнитный экран более надежный, чем металлический [59-63].

Последние годы в качестве закладных неизвлекаемых греющих элементов широко применяются стальные изолированные провода, которые достаточно удобны в применении и имеют сравнительно невысокую стоимость [1].

Применение электроразогрева с помощью закладных нагревателей хотя и уменьшает неравномерность прогрева железобетонных изделий, не позволяет полностью избавиться от этого недостатка, а также заметно усложняет технологию тепловой обработки и повышает её стоимость.

В настоящее время созданы и успешно эксплуатируются промышленные высокопроизводительные установки для тепловой СВЧ обработки железобетонных изделий [33]. Микроволновая обработка обеспечивает

эффективное использование потребляемой энергии, тепловое воздействие оказывается равномерно распределенным по всему объему железобетонного изделия. В результате значительно ускоряется технологический процесс. Однако такой способ обработки также не лишен серьезных недостатков. К ним следует отнести сложность и высокую стоимость оборудования и его эксплуатации, повышенное энергопотребление, а также наличие фактора опасности - СВЧ излучения, которое является причиной профессиональных заболеваний.

С учетом сказанного выше актуальной является задача применения метода, свободного от недостатков микроволновой технологии при сохранении ее достоинств. Таким методом может являться разогрев изделий за счёт выделения тепла в бетоне при прохождении через него электрического тока – электродный метод [1]. При его использовании достигается объемно-однородное выделение тепла и прогрев железобетонного изделия, а величина удельного расхода электроэнергии в 3 ÷ 9 раз меньше по сравнению с микроволновой обработкой, что свидетельствует о высокой энергетической эффективности такого разогрева.

При этом используются две разновидности такого метода: периодический электроразогрев [1,33-43,64-68] и непрерывный [1,12,13,69-74]. В первом случае электроразогрев осуществляется после закладки бетонной смеси в опалубку. Для пропускания электрического тока через толщу бетона либо используются погруженные электроды (например, стержневые), которые помещаются в бетон, либо электродами являются две противоположные металлические грани опалубки, а остальные грани выполняются диэлектрическими.

При непрерывном разогреве бетонная смесь нагревается в процессе ее прохождения по транспортирующей трубе длиной несколько метров с постоянной скоростью. По оси транспортирующей трубы установлен цилиндрический электрод, на который подано напряжение (транспортирующая труба - заземлена) [1,4-7,12,13,69-74].

Электрический ток, разогревающий бетонную смесь, протекает в зазоре между двумя трубами. Подача бетонной смеси при непрерывном

электроразогреве осуществляется либо естественным путем (под действием собственного веса) либо принудительно (например, с помощью винтового конвейера) [71].

При использовании периодического электроразогрева железобетонных изделий в опалубке часто возникает проблема обеспечения хорошего электрического контакта электрода с поверхностью бетона. Такая проблема успешно решается изготовлением электродов из электропроводящих упругих материалов, например, электропроводного полипропилена [75]. Под действием прижимающего усилия такой материал плотно прилегает к поверхности твердеющего бетона, повторяя все его неровности, и обеспечивает качественный электрический контакт по всей поверхности.

При электродном методе электротепловой обработки бетона применяются переменные и постоянные (знакопеременной полярности) электрические напряжения. Проведенными исследованиями не установлено влияние вида напряжения на прочность бетона.

Для некоторых видов железобетонных изделий (например, из полистиролбетона и керамзитобетона) применение электроразогрева токами, протекающими в толще бетона, оказалось единственным технически удобным и эффективным способом их тепловой обработки [76-82]. Кроме этого, при такой электротепловой обработке можно эффективно управлять этим процессом (в том числе автоматически) при изготовлении разнообразных изделий с целью интенсификации технологического процесса, достижения максимальной производительности и снижения влияния деструктивных процессов на прочность бетона [79,81-85].

С целью повышения качества готовых железобетонных изделий электроразогрев целесообразно применять в сочетании с другими видами обработки, например, вибро и вакуумной обработкой [70,73,86-88]. Это позволяет эффективно перемешивать бетонные смеси, удалять из них пузырьки воздуха и излишнюю влагу, что приводит к повышению прочности бетона. Эффективным

средством уменьшения времени тепловой обработки и снижения затрат энергии является применение термосной и термоактивной опалубки [54,65].

При использовании электроразогрева бетонных смесей токами, протекающими в толще бетона, большое значение приобретают сведения об электропроводности бетона. Выполненные исследования показали, что удельное объемное электрическое сопротивление бетонных смесей в сильной степени зависит от температуры и состава бетона [1,89] и позволили разработать математическую модель процесса непрерывного электроразогрева в транспортирующей трубе [74]. Важной особенностью электродного метода в установках периодического действия является то, что обрабатываемое изделие представляет собой для источника электрического питания специфическую нагрузку, электрическое сопротивление которой в ходе электротепловой обработки может изменяться разнонаправлено в широких пределах (более чем в 2 раза) вследствие соответствующего изменения удельной электрической проводимости бетона [1]. Поэтому актуальной задачей строительного материаловедения была разработка математической модели электрической проводимости бетона [90], которая учитывает влияние таких важнейших факторов, как время и температура, что необходимо для разработки методов расчёта технологического оборудования и режимов его работы. Выполненные теоретические разработки [91] привели к созданию математической модели удельной электропроводности бетона, которая дает удовлетворительное описание зависимости этого параметра от температуры и времени в ходе тепловой обработки.

Как отдельный метод электротепловой обработки рассматривается форсированный электроразогрев бетона в установках непрерывного и периодического действия, когда нагрев материала до конечной температуры происходит за малый промежуток времени (не более 15÷20 мин) с одновременным уплотнением [1]. Последние годы изучению и применению такого метода уделяется большое внимание, т.к. он позволяет повысить производительность технологического процесса, а также минимизировать

затраты и потери энергии [13,65,92-94]. Недостатком этого метода являются потребность в источнике питания большой мощности, нелинейное и значительное изменение потребляемой мощности в ходе электротепловой обработки (для установок периодического действия), трудности с распределением нагрузки трёхфазной питающей сети.

В некоторых случаях удобным и перспективным способом электроразогрева является разогрев изделия токами, протекающими по элементам его металлической арматуры [1]. Эти токи могут возбуждаться индукционным способом, т.е. воздействием на изделие переменного электромагнитного поля с частотой до нескольких тысяч герц. Такой индукционный нагрев целесообразно применять, прежде всего, для густоармированных железобетонных изделий в виде тел вращения, например, железобетонных труб [95]. Недостатком этого способа электроразогрева является то, что тепло выделяется в элементах арматуры и распространяется, затем, в толще бетона. Поэтому может возникать неравномерный прогрев.

Разработан и успешно применяется разогрев таких изделий с равномерным распределением арматуры по сечению в электромагнитном поле промышленной частоты, который обеспечивает высокую однородность температурного поля [55]. Однако использование индукционного прогрева требует применения весьма сложного и дорогостоящего оборудования, пригодного для изготовления ограниченного набора изделий, что делает его недоступным или невыгодным для предприятий малого и среднего бизнеса.

Важным преимуществом почти всех способов электроразогрева является простота, надежность, высокая энергетическая эффективность и высокий коэффициент полезного действия (не ниже 95%) источников питания установок такого типа.

До недавнего времени актуальной задачей в сфере методов электротепловой обработки бетона является дальнейшее развитие и совершенствование методов расчёта технологических установок применительно к условиям предприятиям сборного железобетона. Существующие разработки [1] соответствуют, в

основном, условиям зимнего бетонирования и монолитного домостроения, при которых к электротепловой обработке предъявляются иные требования. Например, нет жестких требований по срокам созревания бетона, не имеет большого значения величина коэффициента полезного действия технологического процесса, т.к. в этих условиях чаще доминирующей целью является – не допустить замерзания бетона, значительных градиентов тепло-влажносодержания, потери влаги и др. При использовании электротепловой обработки бетона на предприятиях сборного железобетона первостепенными становятся такие соображения, как увеличение производительности технологического процесса, уменьшение затрат и потерь энергии, снижение эксплуатационных издержек, с целью повышения технико-экономических показателей производственного процесса и конкурентоспособности предприятия. С этой точки зрения весьма привлекательным является применение электротепловой обработки бетона в сочетании с другими методами энергосбережения, развитию и применению которых в последнее время уделяется повышенное внимание [96].

При решении задач по разработке технологических процессов и оборудования нельзя обойти вниманием попытки специалистов создать универсальные методы расчёта электротермических процессов и установок [97], которые теоретически применимы и к электротепловой обработке бетона.

В целом можно констатировать наличие явного противоречия: с одной стороны, электротепловая обработка бетона и железобетонных изделий представляет собой прогрессивный и весьма удобный технологический процесс, обладающий высокой энергетической эффективностью (приближающейся к 100 %), с другой, на предприятиях сборного железобетона продолжают применяться традиционные методы тепловой обработки (ТВО, обработка продуктами сгорания природного газа), требующие сложного, громоздкого и дорогого оборудования и обладающие низкой энергетической эффективностью (не более 12 %). При этом традиционные методы тепловой обработки железобетонных изделий невыгодны и практически недоступны предприятиям малого и среднего

бизнеса. Причиной такого положения дел являются отсутствие средств аппаратной реализации электротепловой обработки в условиях предприятий, недостаточный уровень теоретических разработок в этой сфере и практически полное отсутствие сведений о технико-экономических показателях технологического процесса с применением такой обработки.

1.3. Перспективные направления научно-технического прогресса по электротепловой обработке на предприятиях сборного железобетона

В последние годы выполнен достаточно большой объем экспериментальных исследований и теоретических разработок по практической реализации электротепловой обработки бетона и железобетонных изделий токами повышенной частоты с помощью источников питания на основе полупроводниковых (транзисторных) преобразователей напряжения на предприятиях сборного железобетона [98-103].

Благодаря предпринятым усилиям к настоящему времени достигнут значительный прогресс в вопросах теории ЭТО: разработана общая методология создания и применения процессов ЭТО, который базируется на решении феноменологических дифференциальных уравнений тепломассопереноса при наличии источника тепла в объёме материала, мощность которого определяется решением уравнений электрического поля в материале с комплексной (активно-ёмкостной) электрической проводимостью в сочетании с использованием целого ряда дополнительных теоретических моделей и расчётных методов [90,99,100]. Эта методология может быть наглядно представлена в виде блок-схемы приведенной на рис. 1.1 [90,100]. Хотя такая методология разработана применительно к наиболее энергетически эффективному способу ЭТО – электродному, когда разогрев материала производится пропусканием в его толще электрического тока, она имеет универсальный характер и применима ко всем известным к настоящему времени схемам ЭТО [1].

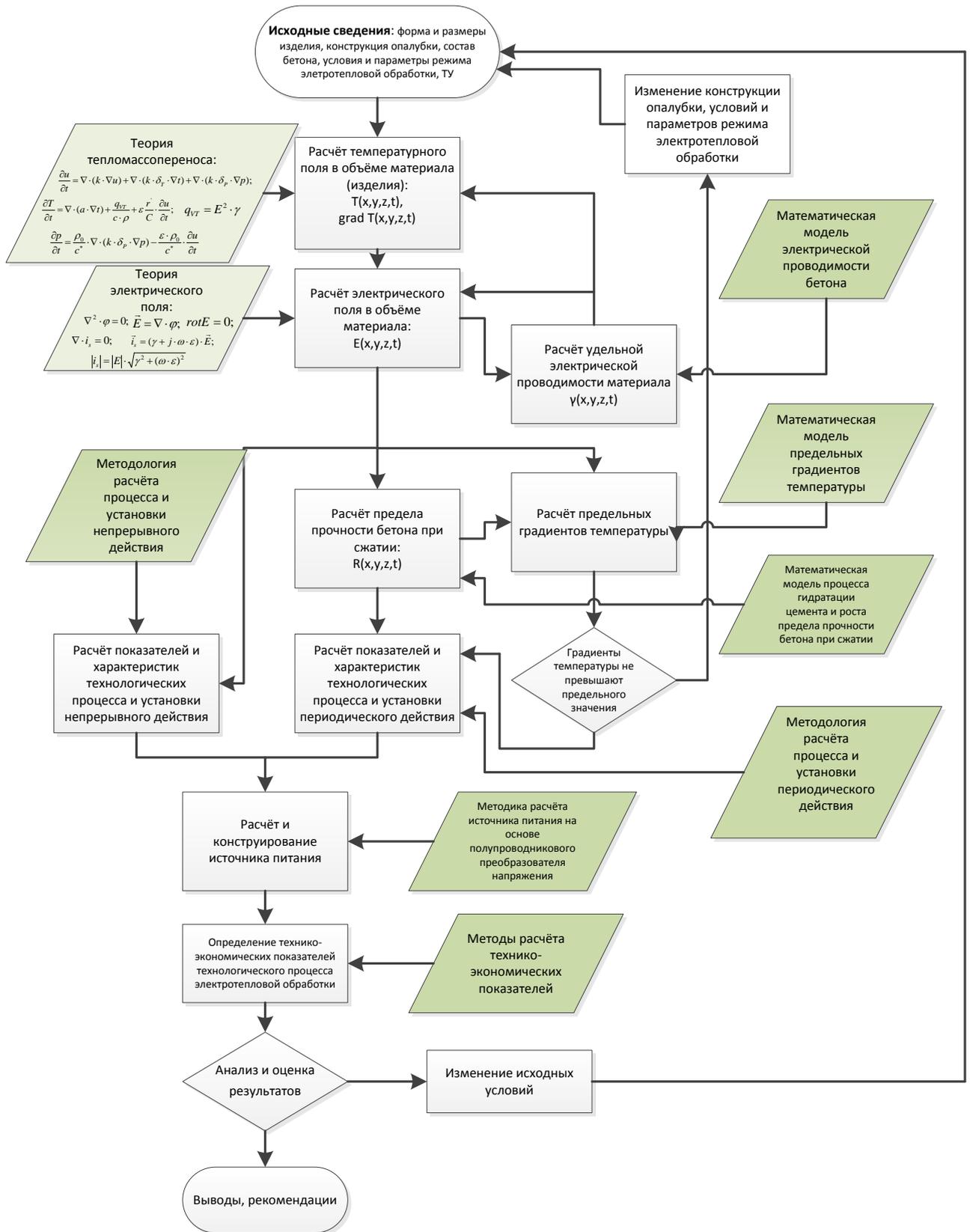


Рис. 1.1. Методология исследования и разработки процессов электротепловой обработки бетона и железобетонных изделий: условные обозначения: элементы, выделенные заливкой, – теоретические модели и методы; светлые – процесс

Предложенная методология (рис. 1.1) устанавливает связь между параметрами, которые влияют на процесс электротепловой обработки или позволяют управлять им (вид и состав бетона, конструкция, объём и модуль поверхности, конструкция и параметры опалубки и теплоизоляции, параметры режима электротепловой обработки, величина электрического напряжения, мощность, передаваемая в обрабатываемое изделие) и показателями и характеристиками, которые позволяют оценивать результаты этой обработки (динамика изменения предела прочности бетона при сжатии, затраты и потери энергии, коэффициент полезного действия (КПД) процесса, скорость охлаждения после прекращения электротеплового воздействия, длительность технологического процесса, номинальные параметры источника питания, стоимость электротепловой обработки и себестоимость технологического процесса) [90,100]. Это позволяет исследовать закономерности и характеристики процессов электротепловой обработки токами повышенной частоты с использованием средств компьютерного моделирования, выполнять расчёт устройств для электротепловой обработки различных видов строительных материалов, бетона и железобетонных изделий любого типа, режимов их работы, а также выполнять теоретическими методами исследования и сравнительные оценки этих установок. Наиболее оригинальными теоретическими разработками являются теория и математическая модель процессов гидратации цемента и набора прочности бетоном при воздействии повышенной температуры в процессе электротепловой обработки; математическая модель динамики предельных температурных градиентов в изделиях в процессе их тепловой обработки; математическая модель электрической проводимости бетона [100].

Например, согласно математической модели процессов гидратации цемента и набора прочности бетоном значение важнейшего показателя бетона – предела механической прочности на сжатие в любой момент ЭТО и после ее завершения можно определить по формуле [100]

$$R_{сж} = R^m \cdot G = R^m \cdot [1 - \exp(-K \cdot t)], \quad (1.1)$$

где G – степень гидратации цемента в процессе твердения бетона; K – константа скорости химической реакции (реакции гидратации цемента); R^m – максимальная

прочность, достигаемая при завершении гидратации цемента ($G=1$); процедура вычисления этих показателей подробно описана в [100].

Математическая модель динамики предельных температурных градиентов $gradT$ в изделиях в процессе их тепловой обработки предполагает определение изменения во времени наибольших значений $gradT$, возникающих в объеме железобетонного изделия в ходе его ЭТО, посредством расчета характеристик температурного поля. Затем эти значения сравниваются характерными граничными величинами [100]:

$$gradT_{np}^0 = \frac{64,4(0,35 \cdot \lg R_{сж} - 0,15)^{\frac{2}{3}} \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{R_{сж}^2}}{E \cdot \alpha_t \cdot \ell}, \quad (1.2)$$

– это верхняя граница области абсолютно безопасных значений градиентов температуры,

$$gradT_{np}^v = \frac{64,4(0,35 \cdot \lg R_{сж} + 0,175)^{\frac{2}{3}} \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{R_{сж}^2}}{E \cdot \alpha_t \cdot \ell}, \quad (1.3)$$

– это нижняя граница области абсолютно опасных значений градиентов температуры; E – модуль упругости материала (бетона); α_t – коэффициент линейного расширения бетона; β – коэффициент формулы Фере; ℓ – размер железобетонного изделия; порядок определения этих параметров приведен в [100].

Как показано в [100], многократное появление градиентов $gradT < gradT_{np}^0$ и соответствующих внутренних механических напряжений в материале наблюдаются только упругие деформации, что не приводит к снижению прочности материала, и режим ЭТО, при котором достигается выполнение этого условия, является наилучшим. Превышение второго (1.3) граничного значения ($gradT > gradT_{np}^v$) приводит появлению внутренних напряжений, вызывающих выраженные и быстро нарастающие разрушения структуры бетона, сопровождающиеся псевдопластическими деформациями [100]. 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 объёме материала (бетона), а многократные нагружения вызывают постепенное снижение прочности. Тем не менее, как показывают выполненные ранее исследования, однократное появление таких градиентов в ходе ЭТО не влечет отрицательных последствий [100].

В результате разработки математической модели удельной проводимости бетона была получена общая формула, описывающая зависимость этого параметра от двух важнейших факторов – температуры материала и времени [100]:

$$\gamma = \gamma_{ц0} \cdot V_{ц}^* \cdot e^{\left(\frac{b \cdot T}{[T+273] \cdot 273} - M \cdot \int_0^t T^{\beta} \cdot dt \right)} = \gamma_0 \cdot e^{\left(\frac{b \cdot T}{[T+273] \cdot 273} - M \cdot \int_0^t T^{\beta} \cdot dt \right)}, \quad (1.4)$$

где $\gamma_0 = \gamma_{ц0} \cdot V_{ц}^*$ – удельная проводимость свежего бетона при температуре $T=0^{\circ}\text{C}$, а $V_{ц}^*$ – объёмная доля цементного теста, T – закон изменения температуры во времени; остальные параметры – постоянные величины; порядок расчетов с использованием формулы (1.4) подробно описан в [100].

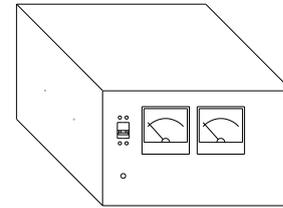
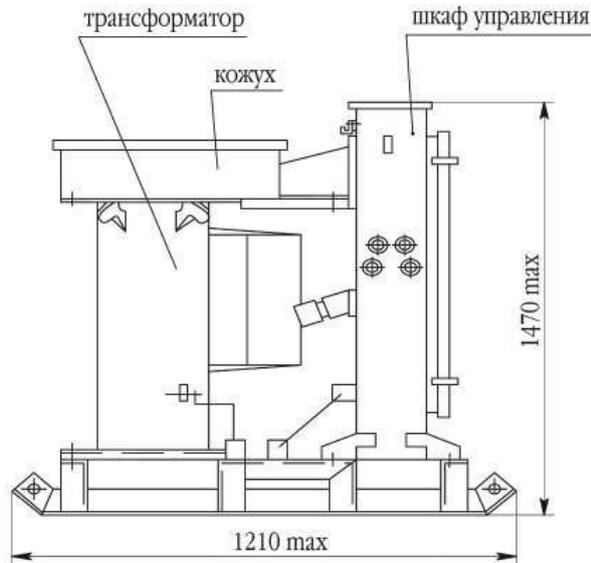
Использование формулы (1.4) позволяет прогнозировать изменение во времени электрических параметров ЭТО: электрических мощности, передаваемой в объект обработки, тока, напряжения на электродах изделия, а такие характеристики являются основой для рационального конструирования источников питания, предназначенных для выполнения ЭТО [100].

Однако важнейшим и обязательным элементом этой методологии (рис. 1.1) является процедура расчета характеристик температурного поля в объеме железобетонного изделия в ходе ЭТО на основе современных представлений о процессах тепло- массопереноса, в развитие которых внесли значительный вклад ряд отечественных ведущих специалистов (А.В. Лыков, С.П. Рудобашта, С.В. Федосов, В.С. Грызлов и др.). Без знания этих характеристик невозможно обеспечить квалифицированную разработку и применение на практике процессов ЭТО. Поэтому в настоящее время существует задача создания библиотеки и накопления в ее составе методов и методик расчета таких характеристик применительно реальным ситуациям, что обеспечить благоприятные условия

широкого распространения ЭТО токами повышенной частоты на предприятиях сборного железобетона. В частности, актуальной является задача разработки достаточно простой инженерной методики расчета характеристик температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонных изделий в ходе их электротепловой обработки.

В качестве эффективного аппаратного средства реализации ЭТО было предложено использовать источники питания, выполненные на основе полупроводниковых (транзисторных) преобразователей напряжения, выходное переменное напряжение которых имеет повышенную частоту ($10\div 20$ кГц) [100]. Такие источники питания обладают замечательными эксплуатационными показателями: они имеют малые габариты и вес (как правило, могут перемещаться одним человеком), удобны и просты в обращении, практически не требуют ухода, надёжны в работе, неприхотливы к условиям работы (прекрасно работают при отрицательных температурах), подготовка к работе не превышает 5 мин., обеспечивают плавную регулировку мощности от нуля до номинального значения и др. Существуют благоприятные условия для полной автоматизации процесса изготовления строительных материалов и железобетонных изделий. Для наглядного представления можно сравнить: с одной стороны, существующая подстанция промышленной частоты 50 Гц для тепловой обработки бетона промышленного изготовления типа КТПТО-80 имеет габариты $1400\times 1210\times 1470$ и вес около 800 кг, с другой, вес источника нового типа не более 30 кг и размеры со средний чемодан (рис. 1.2) [101]. В настоящее время на мировом рынке электронной продукции появились транзисторы с предельными параметрами по току до 2500 А, по напряжению до 3000 В, что позволяет создавать источники питания на основе полупроводниковых преобразователей единичной мощностью до $200\div 300$ кВт. Анализ литературных сведений позволяет сделать вывод, что таких параметров вполне достаточно для решения всех задач в области электротепловой обработки бетона и других строительных материалов. Выполненные исследования подтвердили высокую эффективность электротепловой обработки бетона токами повышенной частоты электродным

методом (т.е. посредством электротепловой обработки бетона токами, протекающими в его толще) с помощью источников питания нового поколения (рис. 1.2). Например, стоимость тепловой обработки снижается, как минимум, в $4\div 7$ раз [100].



а)

б)

Рис. 1.2. Источники питания для электротепловой обработки бетона.

а) подстанция типа КТПТО-80,

б) источник на основе транзисторного преобразователя напряжения

Такие показатели обусловлены тем, что применение электротепловой обработки позволяет многократно снизить потери энергии и величину энергии, которая расходуется на тепловую обработку. При этом изделие воспринимает не менее 80 % израсходованной энергии в случае использования тяжелого бетона и не менее 65 % при использовании лёгкого (пенополистирольного) бетона [100]. Доля стоимости тепловой обработки в стоимости технологического процесса уже не превышает $8\div 12$ % (против 35-40 % при ТВО) [100,102]. В случае полной замены существующей ТВО электротепловой обработкой токами повышенной частоты ожидается снижение технологической себестоимости приблизительно на 25 % за счёт исключения расходов на тепловую технологическую энергию с заменой их расходами на силовую электрическую энергию меньшей величины, а также за счёт снижения затрат на содержание оборудования и помещений [100,102]. В настоящее время не существует других способов такого же снижения величины этой себестоимости. Показатели экономической эффективности (экономия на себестоимости, капиталовложения в переоснащение производства, срок окупаемости капиталовложений – не более 1 года) убедительно свидетельствуют об экономической целесообразности применения

электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты в условиях предприятий сборного железобетона [100-102].

Одновременно, заметно улучшается качество изготавливаемых железобетонных изделий благодаря значительно более однородному прогреву материала с уменьшением вероятности его повреждения внутренними напряжениями, отмечается заметное увеличение предела прочности бетона при сжатии (на 25÷28% в возрасте 28 суток) [101].

Наконец, такую обработку можно с одинаковым успехом применять, как в производственных условиях гигантов строительной индустрии, так и в условиях малых предприятий с ограниченными площадями и мощностью сетей электроснабжения [100].

Неоспоримым преимуществом источников питания и систем электроснабжения на основе полупроводниковых преобразователей напряжения является то, что при их подключении к 3-х фазной питающей сети промышленной частоты обеспечивается практически идеально симметричное распределение мощности по фазам. На стороне повышенной частоты получается однофазное переменное напряжение, что существенно упрощает конструкцию установки для электротепловой обработки и позволяет полностью избавиться от проблемы выравнивания нагрузки 3-х фазной сети. Они будут весьма удобны для применения на предприятиях строительной индустрии, в частности, при осуществлении электротепловой обработки железобетонных изделий, когда необходимо подвести электроэнергию к большому количеству объектов обработки.

Вместе с тем, нельзя не отметить, что в деле применения ЭТО токами повышенной частоты сделаны лишь первые шаги и для широкого применения такого технологического приема требуются дальнейшие теоретические и практические разработки применительно к обработке конкретных железобетонных изделий, а также создание и исследование опытно-промышленных установок, предназначенных для изготовления таких изделий с использованием ЭТО токами повышенной частоты [103].

1.4. Параметры тепловой обработки железобетонных изделий

При осуществлении тепловой обработки железобетонных изделий с помощью ТВО, обработки продуктами сгорания газа или подогрева опалубки горячей водой (водяным паром) этот процесс описывается графиком, показанном на рис. 1.2 и представляющем собой зависимость температуры в пропарочной камере от времени обработки [1,4-7]. Тепловой обработке предшествует стадия предварительной выдержки, т.е. период времени от укладки бетона в опалубку или формовки изделия (при безопалубочной технологии изготовления) до начала обработки, который на практике обычно составляет $\Delta t = 2 \div 4$ часа [1,4-7]. Такая выдержка необходима для начального схватывания бетона до начала тепловой обработки для того, чтобы не допустить размывания поверхности изделия влагой, которая конденсируется в ходе ТВО. Процесс тепловой обработки складывается из трёх составляющих: стадии нагревания от начальной температуры T_n (температуры окружающей среды) до температуры изотермической стадии $T_{изот} = 50 \div 80$ °С, изотермической стадии, в течение которой температура изделия остаётся неизменной $T = T_{изот} = \text{const}$ и стадии охлаждения, в течение которой температура постепенно снижается от $T_{изот}$ до температуры окружающей среды T_o . Увеличение температуры в течение стадии нагревания обычно имеет линейный характер, а длительность этой стадии составляет обычно $\Delta t_{нагр} = 1-4$ часа (в установках непрерывного электроразогрева около 0,25 часа). Длительность изотермической стадии составляет $\Delta t_{изот} \geq 10 \div 14$ часов. Уменьшение температуры в пропарочной камере на стадии охлаждения, также происходит по линейному закону, её длительность обычно составляет не менее 6-7 часов.

Реальное изменение температуры во времени в различных точках объёма обрабатываемого изделия может существенно отличаться от графика, представленного на рис. 1.3, что подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований [104-108] и приводит к появлению заметных температурных градиентов в толще бетона, что может негативно влиять на

процесс его твердения и качество получаемых изделий. Величина этих градиентов может быть достоверно определена посредством расчётов или эксперимента [104-108].

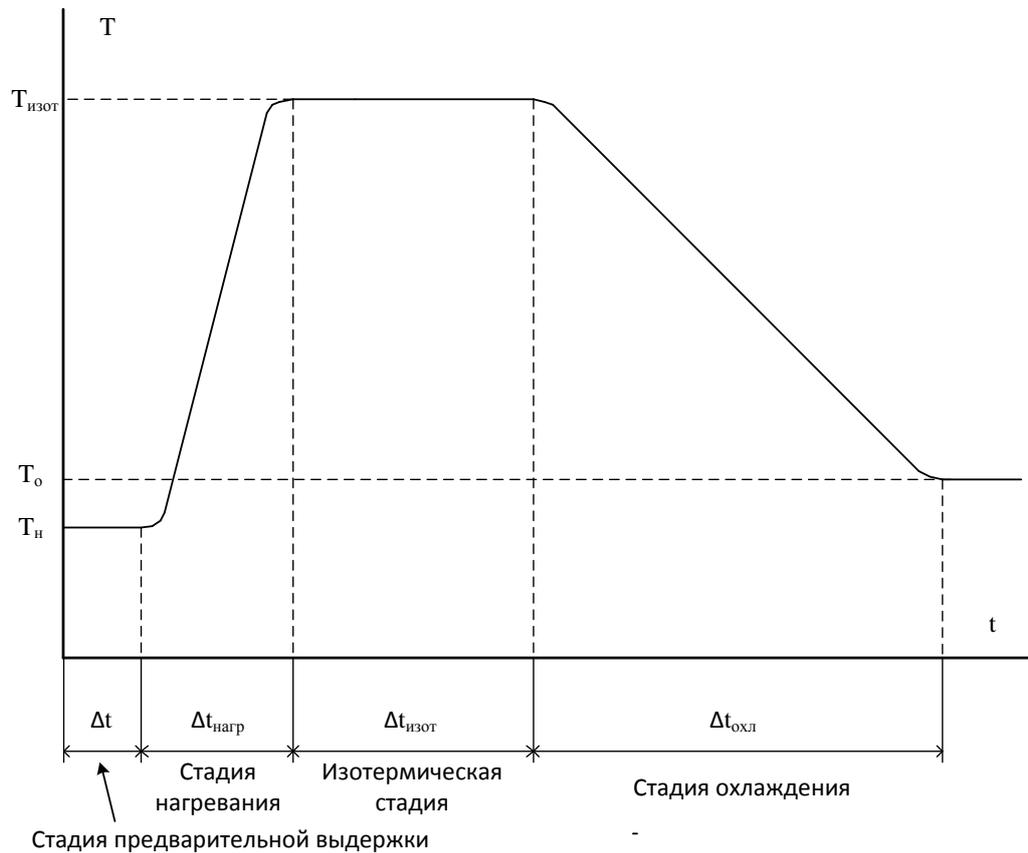


Рис. 1.3. Типичный график (режим) тепловлажностной обработки (ТВО) железобетонных изделий (изменение температуры в пропарочной камере): T_n – начальная температура бетона, $T_{изот}$ – температура изотермической стадии, T_o – температура окружающей среды; Δt – длительность предварительной выдержки (время от укладки бетона до начала тепловой обработки), $\Delta t_{нагр}$ – длительность стадии нагрева, $\Delta t_{изот}$ – длительность изотермической стадии, $\Delta t_{охл}$ – длительность стадии охлаждения.

В целях получения качественных железобетонных изделий к параметрам тепловой обработки предъявляются определённые требования [1,4-7]. Соблюдение этих требований позволяет не допустить появления в объёме изделия неравномерных температурных полей, чрезмерного перегрева бетона на отдельных участках, что отрицательно сказывается на механической прочности материала. Так для стадии нагрева существуют предельные значения скорости подъёма температуры, которые определяются величиной модуля поверхности изделия $M_{II}=F/V$, характеризующего степень массивности конструкции, где F – суммарная площадь поверхности изделия в m^2 , V – объём

железобетонной конструкции в м^3 . Численные значения предельной скорости подъема температуры приведены в табл.1.1 [1,4-7].

Предельные значения скорости подъема температуры

Таблица 1.1

M_{II}	м^{-1}	2-6	6-9	9-15
Скорость подъема температуры	$^{\circ}\text{C}/\text{час}$	8	10	15

Для изотермической стадии существуют предельные значения температуры $T_{изот}$, определяемые видом цемента, использованного при приготовлении бетона, величиной модуля поверхности изделия (табл. 1.2) [1,4-7].

Максимальные температуры изотермической стадии

Таблица 1.2

Цемент	$M_{II}, \text{м}^{-1}$		
	6-9	10-15	16-20
Шлакопортландцемент и пуццолановый портландцемент	80	70	60
Портландцемент и быстротвердеющий портландцемент	70	65	55

Для стадии охлаждения существует предельная величина скорости остывания, которая зависит от вида железобетонной конструкции и модуля её поверхности, численные значения которой приведены в табл. 1.3 [1,4-7].

В результате выполнения требований, представленных в табл.1.1-1.3, бетон после завершения тепловой обработки должен достигать отпускной (распалубочной) механической прочности (предела прочности бетона при сжатии), которая обычно составляет 70 % от нормированной в возрасте 28 суток (на практике колеблется в пределах от 25-30 % до 80 % в зависимости от типа и назначения железобетонной конструкции) [1,4-7]. Достижение этой прочности позволяет выполнять распалубку готовых железобетонных изделий, а также другие операции (транспортировку, снятие предварительного напряжения арматуры, распиловка изделий и др.) без риска их повреждения и обеспечивает увеличение механической прочности бетона до нормированного значения в процессе дальнейшего созревания.

Пределные значения скорости остывания

Таблица 1.3

Конструкции	M_{II}	Скорость остывания °С/час
Бетонные слабоармированные и железобетонные	10-15	12
	6-8	5
Железобетонные Средне- и сильноармированные	3-5	2-3
	8-15	Не более 15

Соблюдение этих требований, вместе с тем, не даёт полной уверенности в том, что в процессе тепловой обработки удастся избежать появления неравномерных температурных полей в объёме изделия и их отрицательных последствий. Поэтому в последнее время усилия исследователей направлены на разработку математического моделирования процессов тепло- и массопереноса и методов управления этими процессами на основе такого моделирования для достижения наиболее благоприятных режимов тепловой обработки железобетонных изделий [47,48,68,100,105,106,108-110]. Целесообразно дальнейшее развитие методов математического моделирования процессов тепло-массопереноса применительно к различным процессам электроразогрева бетонных смесей и изделий, так как решение такой задачи занимает центральное место в методологии (рис. 1.1) создания и применения процессов ЭТО токами повышенной частоты.

В результате выполненных экспериментальных исследований процессов ЭТО токами повышенной частоты [100] был выявлен ряд заметных особенностей и отличий такой тепловой обработки в сравнении с традиционными методами. В частности, при осуществлении такой обработки необходимо применять качественную теплоизоляцию на поверхности опалубки или изделия (при безопалубочной технологии изготовления). В результате этого значительно уменьшается неоднородность температурного поля в объёме изделия, а график тепловой обработки вида рис. 1.3 представляет собой уже изменение температуры практически во всех точках объёма материала обрабатываемого изделия [100]. Таким образом, достигается высокая однородность прогрева материала и одинаковые условия твердения бетона по всему объёму изделия,

недостижимые при традиционных методах тепловой обработки. При электротепловой обработке не требуется предварительная выдержка Δt (рис. 1.3), длительность стадии нагрева должна быть не менее 3 ч., существенно сокращается длительность изотермической стадии до $\Delta t_{изот} \leq 2$ ч. Электротепловую обработку целесообразно проводить при минимальных значениях температуры изотермической стадии $T_{изот} \leq 40-50$ °С. Существует возможность плавного управления параметрами графика тепловой обработки вида рис. 1.3 в широких пределах. Поэтому одной из важнейших задач дальнейших исследований в сфере ЭТО токами повышенной частоты является разработка рациональных режимов (графиков) ЭТО при изготовлении различных железобетонных изделий.

1.5. Выводы, цель и задачи диссертационного исследования

Результаты изучения литературных источников позволяют сделать следующие выводы.

- Обязательной стадией изготовления железобетонных изделий на предприятиях сборного железобетона является их тепловая обработка, для выполнения которой применяются традиционные методы: ТВО водяным паром, обработка продуктами сгорания природного газа, подогрев опалубки горячей водой или паром. Однако эти методы имеют крайне низкую энергетическую эффективность, например при ТВО обрабатываемое изделие воспринимает не более 12 % энергии пара. Это приводит к тому, что тепловая обработка обладает наибольшей и значительной долей в стоимости технологического процесса на предприятиях сборного железобетона (35-40 %), требует применения сложного, дорогостоящего оборудования и заметно ухудшает технико-экономические показатели предприятий сборного железобетона. Традиционные методы тепловой обработки практически недоступны и невыгодны предприятиям среднего и малого бизнеса.

- Эффективным способом, позволяющим существенно снизить затраты на тепловую обработку железобетонных изделий, является применение электротепловой обработки (ЭТО) таких изделий электродным методом, при использовании которой энергетическая эффективность может приближаться к 100 %. До недавнего времени использование ЭТО в условиях предприятий сборного железобетона сдерживалось отсутствием необходимого, удобного и недорогого оборудования для выполнения такой обработки в производственных условиях, а также недостаточным уровнем теоретических разработок в этой сфере.
- К настоящему времени разработана общая методология создания и применения процессов электротепловой обработки железобетонных изделий на предприятиях сборного железобетона [100]. Эта методология позволяет методами компьютерного моделирования исследовать показатели и характеристики таких процессов в целях создания рационального оборудования для осуществления ЭТО и выбора режимов его работы, оставляя за экспериментом средство проверки правильности выбранных технических решений. Центральное место в этой методологии занимает расчет температурных полей в объеме материала обрабатываемого изделия с определением значений температуры и величины градиентов температуры в различных точках. Эти показатели определяют условия твердения бетона, а также опасность его повреждения под действием внутренних напряжений, возникающих вследствие наличия температурных градиентов [100].
- Наличие и применение такой методологии позволяет существенно сократить затраты средств и времени на создание новых технологических процессов и оборудования для их осуществления. Вместе с тем, эта методология требует дальнейшего уточнения и развития. Например, одной из важнейших задач является разработка методики расчета температурных полей в объеме обрабатываемого изделия при неоднородном тепловыделении, которое часто наблюдается при применении электродного метода ЭТО. Другой важной задачей является разработка достаточно простых инженерных методов расчета двух- и трехмерных температурных полей, которые часто встречаются на практике и для определения которых в настоящее время применяют методы численного расчета

температурных полей (например, метод конечных элементов), которые требуют специальной подготовки пользователя, сложной программно-алгоритмической реализации, а также больших затрат сил и времени на программирование, отладку программ, проведение расчетов. В целом же существует задача разработки библиотеки программ для исследования показателей и характеристик ЭТО различных железобетонных изделий методами компьютерного моделирования.

- В качестве удобного и эффективного решения для аппаратной реализации ЭТО предложено применять источники питания нового поколения, выполненные на основе полупроводниковых (транзисторных) преобразователей напряжения большой мощности, выходное переменное напряжение которых имеет повышенную частоту (10-20 кГц), а ЭТО бетона электродным методом с применением таких источников выполняется токами повышенной частоты. Эти источники питания обладают значительно лучшими эксплуатационными показателями по сравнению с существующими источниками питания промышленной частоты 50 Гц. Выполненные лабораторные и производственные экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность ЭТО железобетонных изделий токами повышенной частоты, и в настоящее время широкое применение такой обработки не только на крупных предприятиях сборного железобетона, так и на предприятиях среднего и малого бизнеса можно рассматривать как одно из наиболее перспективных направлений научно-технического прогресса в строительной отрасли.

- К настоящему времени сделаны лишь первые шаги по практическому освоению ЭТО железобетонных изделий токами повышенной частоты. Очевидно, что широкому применению такого технологического приема должно предшествовать его опытно-промышленное апробирование на предприятиях сборного железобетона. Поэтому весьма актуальной задачей является разработка, изготовление и эксплуатация опытно-промышленных установок по изготовлению железобетонных изделий с помощью ЭТО токами повышенной частоты. Это позволит проверить и уточнить как существующие, так и вновь полученные теоретические разработки, накопить опыт практического применения такой

обработки и создать библиотеку технических решений для изготовления разнообразных железобетонных изделий в целях дальнейшего широкого распространения этого перспективного технологического процесса.

Представленные выводы позволяют сформулировать цель и задачи настоящего диссертационного исследования.

Цель работы – разработка процессов ЭТО железобетонных изделий электродным методом токами повышенной частоты, а также необходимого оборудования для производственного применения на основе дальнейшего развития и совершенствования элементов общей методологии создания и применения таких процессов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Разработать методику расчета характеристик стационарного температурного поля в объеме железобетонного изделия при неоднородном тепловыделении в процессе ЭТО.
2. Необходимо сформулировать и обосновать порядок применения принципа суперпозиции при расчете характеристик температурного поля в объеме железобетонного изделия в ходе его электротепловой обработке.
3. Разработать инженерную методику численно-аналитического расчета процесса теплопереноса и стационарного температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонного изделия при его электротепловой обработке на основе предложенного принципа суперпозиции градиентов температуры.
4. Выполнить с помощью этой методики исследования характеристик такого поля применительно к реальным изделиям в целях создания опытно-промышленных установок для производства таких изделий и разработки процесса ЭТО токами повышенной частоты.
5. Составить и обосновать перечень вариантов опытно-промышленной реализации изготовления железобетонных изделий с помощью ЭТО, обеспечить разработку и изготовление опытно-промышленных установок, выполнить экспериментальные исследования характеристик процесса ЭТО токами повышенной частоты в производственных условиях.

Глава 2. Разработка методов расчета температурных полей в объеме железобетонных изделий в процессе электротепловой обработки

Для успешного применения существующей методологии разработки и применения процессов электротепловой обработки [90,100] железобетонных изделий на предприятиях сборного железобетона требуется детальное изучение температурных полей в объеме материала обрабатываемых изделий. Учитывая разнообразие форм, размеров, конструктивного выполнения выпускаемых изделий, необходима разработка методики расчета характеристик температурных полей, позволяющей исследовать влияние различных и распространенных факторов: неоднородное тепловыделение в объеме материала, распространение теплового потока в изделии переменного поперечного сечения, наличие двух- и трехмерной картины распространения теплового потока.

2.1. Методика расчета температурного поля при неоднородном тепловыделении в объеме материала

Процесс преобразования электрической энергии в тепловую в каждой точке объёма вещества с координатами x, y, z в любой произвольный момент времени t характеризуется объёмной плотностью мощности тепловыделения, Вт/м³ [90,100]

$$q_{VT}(x, y, z, t) = q_{VT} = E^2 \cdot \gamma, \quad (2.1)$$

где E – напряженность электрического поля в этой точке, В/м; γ – удельная электрическая проводимость, 1/Ом·м.

Значение γ может зависеть от достаточно большого количества факторов. Например, для такого материала, как конструкционный бетон, кроме его состава сильное влияние оказывает температура и время [91]. Значение E зависит от величины приложенного к электродам напряжения и формы электрического поля в объёме вещества, т.е. координаты (x, y, z) рассматриваемой точки. Форма

электрического поля для заданного изделия определяется, в свою очередь, размерами, расположением и формой электродов на его поверхности. Это означает, что при электротермической обработке материалов электродным методом существует возможность управления величиной q_{VT} в достаточно широких пределах.

Важнейшей характеристикой термического воздействия на материалы является распределение температуры в объёме вещества $T(x,y,z,t)$ в произвольный момент времени t , знание которого позволяет сделать выводы о результатах такого воздействия [90,100]. Например, эти сведения позволяют оценивать динамику химических реакций гидратации минералогических составляющих цемента и роста во времени важнейшего показателя бетона – предела его прочности при сжатии [111]. Температурное поле в объёме материала при электротермической обработке и при отсутствии массопереноса, которым в большинстве случаев можно пренебречь, описывается дифференциальным уравнением [90,100,105]

$$\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T(x,y,z,t) + \frac{q_{VT}(x,y,z,t)}{c \cdot \rho}, \quad (2.2)$$

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.

Кроме знания температуры в различных точках изделия, не меньшее значение имеют сведения о величине градиентов температуры $gradT(x,y,z,t)$, т.к. их наличие вызывает появление в материале внутренних напряжений, которые могут привести к повреждению обрабатываемого изделия [112]. Поскольку одним из параметров уравнения (2.2) является значение $q_{VT}(x,y,z,t)$, можно предположить, что существует возможность управлять температурным полем в объёме материала с помощью этого параметра. Для анализа условий и возможностей такого управления удобно воспользоваться одномерной (вдоль оси x) схемой теплопереноса (рис. 2.1) [90].

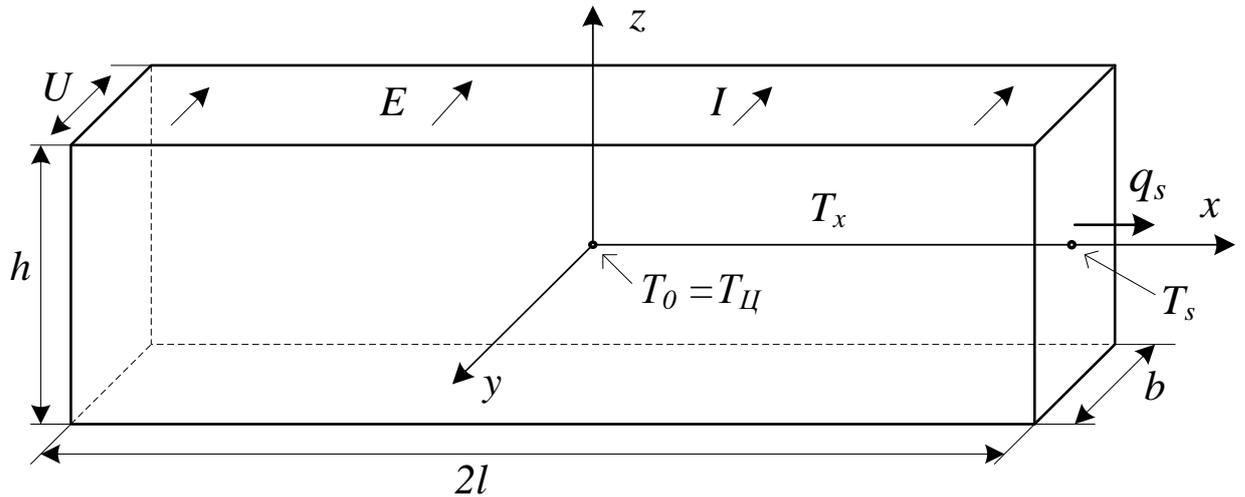


Рис. 2.1. Схема расчёта температурного поля

Тело, представленное на рис. 2.1, может быть, как реальным объектом, так и мысленно вырезанной из него частью. В этом случае уравнение (2.2) приобретает вид

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{q_{VT}(x,t)}{c \cdot \rho}, \quad (2.3)$$

При этом плотность теплового потока q_s вдоль оси x (рис. 2.1) на поверхности объекта, определяется условиями теплопереноса в этой точке. Полагая, что среда однородна, плотность объемного тепловыделения (2.1) имеет одинаковое значение во всех точках $q_{VT}(x, y, z, t) = q_{VT} = const$, т.к. $E = U/b = const$. Обозначив $T(x, t) = T$, для начальной точки системы координат, расположенной в центре объекта (рис. 2.1), будет справедливо следующее условие [90]

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = 0; \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} = 0; \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=0} = 0; T(x=0) = T_0 = T_{ц}. \quad (2.4)$$

В процессе электротермической обработки материал вначале разогревается, как правило, с постоянной скоростью [90]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = g_{нагр}, \quad (2.5)$$

затем выдерживается определенное время при постоянной температуре:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = g_{нагр} = 0, \quad (2.6)$$

Управление величиной $q_{VT}(x)$ предполагает задание определённого закона изменения этого параметра вдоль оси x . С целью упрощения решения уравнения (2.3) следует предположить линейный характер изменения этого параметра, т.к. с помощью кусочно-линейной аппроксимации можно с достаточной точностью представить любой закон его изменения:

$$q_{VT}(x) = q_0 \left(1 + \beta \frac{x}{\ell} \right), \quad (2.7)$$

где q_0 – значение объёмной плотности мощности тепловыделения в начальной точке системы координат, т.е. в центре объекта (рис. 2.1); $0 \leq x \leq \ell$; β – безразмерный коэффициент, например $\beta = -1$ означает, что на границе объекта (рис. 2.1) объёмная плотность мощности снижается до $q_{VT}(x = \ell) = 0$, а при $\beta = 0$ имеет место однородное распределение тепловыделения вдоль оси x : $q_{VT}(x) = q_0 = const$.

С учётом (2.5) и (2.7) уравнение (2.3) приобретает вид

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = g_{нагр} = a \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{q_{VT}(x)}{c \cdot \rho} = a \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{q_0}{c \cdot \rho} \left(1 + \beta \frac{x}{\ell} \right), \quad (2.8)$$

Для предварительных оценок возможностей управления температурными полями в материале при его электротермической обработке целесообразно рассмотреть стационарный режим $\partial T / \partial t = g_{нагр} = 0$, как наиболее простой случай, т.е. $T(x,t) = T(x) = T$. В результате решения уравнения (2.8) с учётом условий (2.4) и (2.6) получены следующие выражения для определения в любой точке оси x значений температуры [113]

$$T_x = T_0 - \frac{q_0}{\lambda} \left(\frac{x^2}{2} + \beta \frac{x^3}{6\ell} \right), \quad (2.9)$$

и градиента температуры

$$grad T_x = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x = -\frac{q_0}{\lambda} \left(x + \beta \frac{x^2}{2\ell} \right), \quad (2.10)$$

Характерно, что для получения соотношений (2.9) и (2.10) не требуется знание граничных условий на поверхности объекта (рис. 2.1), они могут быть найдены с

использований этих выражений, полагая в них $x=l$. Однако при изучении температурных полей в объеме материала в процессе его электротепловой обработке нередко имеет место ситуация, когда известно или задано значение плотности теплового потока q_s вдоль оси x на поверхности объекта (рис. 2.1). Поэтому необходимо получить также выражения вида (2.9) и (2.10) с учетом этого обстоятельства. Согласно теоретическим основам теплопереноса для указанной точки ($x=l$) можно записать уравнение устанавливающее связь между плотностью теплового потока и градиентом температуры [99]:

$$q_s = -\lambda \text{grad}T_{x=l} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=l}, \quad (2.11)$$

которое нетрудно преобразовать к следующему виду

$$\text{grad}T_{x=l} = -\frac{q_s}{\lambda}. \quad (2.12)$$

Приравнявая правые части уравнений (2.10) и (2.12) при $x=l$ после преобразований можно получить формулы устанавливающие связь q_s и q_0 :

$$q_s = q_0 \ell \left(1 + \frac{\beta}{2} \right) \text{ или } q_0 = \frac{q_s}{\ell \left(1 + \frac{\beta}{2} \right)}. \quad (2.13)$$

Не следует забывать, что эти формулы (2.9)÷(2.13) справедливы только для случая стационарного режима (температурного поля): $\partial T / \partial t = \mathcal{G}_{\text{нагр}} = 0$. После подстановки выражения (2.13) для q_0 в (2.9) и (2.10) получены соотношения для определения в любой точке оси x по известной величине q_s значения температуры

$$T_x = T_0 - \frac{q_s}{\lambda \ell \left(1 + \frac{\beta}{2} \right)} \left(\frac{x^2}{2} + \beta \frac{x^3}{6\ell} \right) \quad (2.14)$$

и значения градиента температуры

$$\text{grad}T_x = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x = -\frac{q_s}{\lambda \ell \left(1 + \frac{\beta}{2} \right)} \left(x + \beta \frac{x^2}{2\ell} \right). \quad (2.15)$$

Следует отметить, что полученные выражения для определения закона изменения вдоль оси x температуры (2.9), (2.14) и градиента температуры (2.10) и (2.15) справедливы только для той области значений x , где объемное тепловыделение

отлично от нуля ($q_{VT}(x) \geq 0$). За пределами этой области меняются условия решения уравнения (2.3) и это решение будет иметь другой вид (см. разд. 2.2).

Распространенным случаем возникновения естественного неоднородного выделения тепла в объеме материала является электротермическая обработка электродным методом изделия переменной толщины, как показано на рис. 2.2. В этой ситуации наблюдается постепенное изменение (увеличение) расстояния между электродами d_x от d_0 до d_{max} вдоль координаты x (рис. 2.2) в пределах размеров изделия ($0 \leq x \leq l$), которое, как правило, можно описать линейным уравнением [113]:

$$d_x = d_0 \left(1 + \alpha \frac{x}{l} \right), \quad (2.16)$$

где $\alpha = \frac{d_m}{d_0} - 1$ – безразмерный коэффициент.

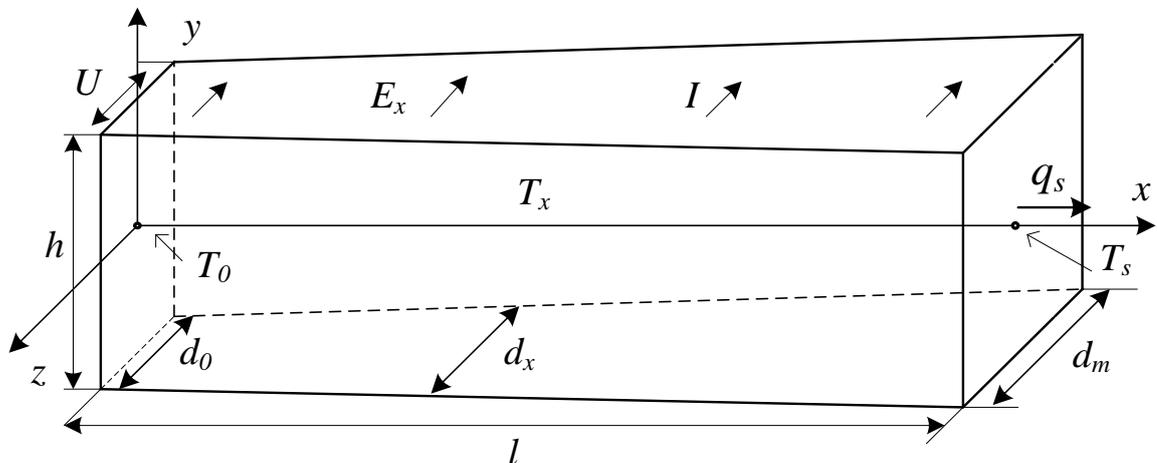


Рис. 2.2. Схема электротепловой обработки изделия переменной толщины

Тогда изменение напряженности электрического поля в объеме материала можно описать следующим соотношением

$$E_x = \frac{U}{d_x} = \frac{U}{d_0 \left(1 + \alpha \frac{x}{l} \right)}, \quad (2.17)$$

Подставляя (2.17) в (2.1) получаем выражение, описывающее изменение объемной плотности мощности тепловыделения вдоль оси x :

$$q_{VT}(x) = \frac{U^2 \gamma}{d_0^2 \left(1 + \alpha \frac{x}{\ell}\right)^2} = q_0 \frac{1}{\left(1 + \alpha \frac{x}{\ell}\right)^2}, \quad (2.18)$$

где $q_0 = U^2 \gamma / d_0^2 = E_0^2 \gamma$, $E_0 = U / d_0$.

Полученная формула (2.18) позволяет сделать вывод, что в этом случае наблюдается уменьшение объёмной плотности мощности по нелинейному закону. После подстановки (2.18) в уравнение (2.3) получаем

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_0}{c \rho \left(1 + \alpha \frac{x}{\ell}\right)^2}, \quad (2.19)$$

для стационарного режима $\left(\frac{\partial T}{\partial t} = 0\right)$ уравнение приобретает вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = T'' = -\frac{q_0}{\lambda \left(1 + \alpha \frac{x}{\ell}\right)^2}, \quad (2.20)$$

решение этого уравнения, как и в предыдущем случае (2.8), выполняется посредством интегрирования с учетом условия $\partial T / \partial x = 0$ при $x=0$:

$$\int_0^{\partial T / \partial x} T'' dx = -\frac{q_0}{\lambda} \int_0^x \frac{dx}{\left(1 + \alpha \frac{x}{\ell}\right)^2}, \quad (2.21)$$

в результате чего получено следующее соотношение для определения изменения градиента температуры вдоль оси x :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = T' = -\frac{q_0 \ell}{\lambda \alpha} \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha \frac{x}{\ell}}\right). \quad (2.22)$$

В ходе дальнейшего интегрирования

$$\int_{T_0}^{T_x} T' dx = -\frac{q_0 \ell}{\lambda \alpha} \int_0^x \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha \frac{x}{\ell}}\right) dx, \quad (2.23)$$

получена формула для определения изменения температуры вдоль этой оси

$$T_x = T_0 - \frac{q_0 \ell}{\lambda \alpha} \left(x - \frac{\ell}{\alpha} \operatorname{Ln} \left| 1 + \alpha \frac{x}{\ell} \right| \right). \quad (2.24)$$

2.2. Обоснование принципа расчета температурного поля в трехмерном пространстве на основе суперпозиции градиентов температуры

Рассмотренные в предыдущих разделах методики расчета температурного поля в железобетонных изделиях при выполнении их электротепловой обработки, основанные на решении одномерного уравнения теплопередачи (2.3), пригодны, в основном, для анализа температурных условий такой обработки в изделиях, у которых один из размеров значительно превышает другие, т.е. в изделиях большой протяженности с малыми поперечными размерами. Как показывает опыт ранее выполненных расчетов и экспериментов [100,114], если поперечные размеры протяженного железобетонного изделия не превышают 15÷20 см, в инженерных расчетах можно пренебречь неоднородностью температурного поля в поперечном направлении. Однако при изготовлении с помощью электротепловой обработки массивных изделий с большими и сопоставимыми размерами во всех трех измерениях требуется исследование температурных полей в трехмерном пространстве объема такого изделия.

В настоящее время существуют методы численного расчета температурных полей в двух- трехмерной системе координат в объеме тел (изделий) различной формы, например метод конечных элементов [115,116]. Однако применение таких методов на практике требует от пользователя высокой профессиональной подготовки, больших затрат сил и времени на разработку и отладку программ, связанных с выполнением сложных и громоздких вычислений. Поэтому существует потребность в разработке более простых и наглядных инженерных методов расчета температурных полей в двух- трехмерном пространстве,

возникающих в процессе электротепловой обработки железобетонных изделий, доступных широкому кругу пользователей и пригодных для исследования температурных характеристик электротепловой обработки железобетонных изделий.

Анализ теоретических разработок, представленных выше (разд. 2.1 и 2.2), позволяет предположить, что подобной метод расчета температурных полей можно создать на основе численно-аналитических вычислений с использованием принципа суперпозиции градиентов температуры [117] при определении значения температуры в заданной точке пространства. Этот принцип предполагает решение вспомогательных задач, т.е. получение частных и одномерных решений уравнения теплопереноса отдельно вдоль каждой из осей системы координат, исходя из граничных условий в направлении каждой оси отдельно [117]. Затем по каждому из полученных решений находится значение температуры в точке с заданными координатами, а окончательный результат, т.е. величина температуры в этой точке, определяется как сумма значений по каждому из частных решений [117]. Однако попытки применить на практике такой способ расчетного определения температурного поля в трехмерном пространстве нередко приводит к результату, который противоречит качественным, физическим, представлениям о процессе теплопередачи. Например, можно представить ситуацию, когда массивный объект в форме куба прогревается со стороны трех взаимно перпендикулярных граней при поддержании постоянного и одинакового значения температуры на этих гранях, которое превышает начальную температуру материала этого объекта. В результате вычислений по описанному выше принципу температура в центре куба даже при отсутствии выделения тепла в объеме материала может оказаться выше, чем на гранях с фиксированной температурой. Вполне очевидно, что этого не может быть с физической точки зрения. Не подвергая сомнению возможность применения принципа суперпозиции для расчета двух- трехмерных температурных полей в объеме строительных изделий, можно сделать вывод, что существует потребность в

переосмыслении и существенной корректировке имеющихся представлений по этому вопросу.

Для разработки обоснованного и корректного с физической точки зрения применения принципа суперпозиции при расчете температурных полей следует обратиться к физической аналогии – методам исследования электростатических полей. Как известно, при расчете таких полей принцип суперпозиции применяется для определения величины и направления одного из важнейших параметров – напряженности электрического поля [118]. Величина этого параметра, представляющего собой градиент другого основного показателя – потенциала электрического поля, находится посредством геометрического суммирования векторов напряженности электрического поля, создаваемых различными источниками (электрическими зарядами) [118]. При рассмотрении температурных полей аналогом напряженности электрического поля является градиент температуры: $grad T$. Как и напряженность электрического поля, этот параметр представляет собой векторную величину и может менять свой знак в зависимости от характера изменения температуры в рассматриваемой точке пространства.

Как представлено на рис. 2.3, в ортогональной системе координат градиент температуры $grad T$, полагая $T = T(x, y, z, t)$, можно рассматривать как геометрическую сумму векторов, направленных параллельно координатным осям. Причем связь векторов по модулю определяется соотношением [99,118]

$$|gradT|^2 = \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial T}{\partial y} \right|^2 + \left| \frac{\partial T}{\partial z} \right|^2. \quad (2.25)$$

Выражение (2.25) означает, что любой точке пространства при известных величине и направлении вектора $grad T$ его можно разложить на составляющие – $\partial T/\partial x; \partial T/\partial y; \partial T/\partial z$, и, наоборот, если определены составляющие $\partial T/\partial x; \partial T/\partial y; \partial T/\partial z$, нетрудно определить величину и направление градиента температуры $grad T$.

В случае, если известно распределение в пространстве (в объеме изделия) величины и направления $grad T$, существует возможность определения значения температуры в любой точке этого объема с произвольными координатами x, y, z по заданной величине температуры в некоторой исходной точке. Например, если известно значение температуры T_A в какой-либо точке на оси x (т. А – рис. 2.3), которое можно определить, в частности, используя расчетную методику, представленную в разд. 2.1, то при перемещении вдоль отрезка АВ длиной R в точку с произвольными координатами (т. В – рис. 2.3), значение температуры в этой точке может быть найдено из соотношения [105,118]

$$T_B = T_A + \int_0^R gradT_r dr, \quad (2.26)$$

где $gradT_r$ – проекция вектора $grad T$ на прямую АВ, dr – бесконечно малый отрезок на прямой АВ (рис. 2.3).

Характерно, что выражение (2.26) автоматически учитывает характер изменения температуры в пространстве. Например, если при перемещении из т. А в т. В наблюдается увеличение температуры, направление вектора $gradT_r$ совпадает с направлением перемещения и его величина в формуле (2.26) присутствует со знаком «+». В результате второе слагаемое в формуле (2.26) имеет величину больше нуля и $T_B > T_A$, как и ожидается в этом случае. В противоположной ситуации, т.е. при уменьшении температуры в направлении от т. А к т. В, величина $gradT_r$ и второе слагаемое в правой части формулы (2.26) имеют отрицательное значение, и в результате расчетов по этой формуле получается, что $T_B < T_A$. Особенностью вычислений по формуле (2.26) является то, что разность температур сравниваемых точек, которую нетрудно выразить из этого выражения:

$$T_B - T_A = \int_0^R gradT_r dr, \quad (2.27)$$

не зависит от абсолютных значений температуры, а определяются характером изменения величины и направления градиента температуры в пространстве.

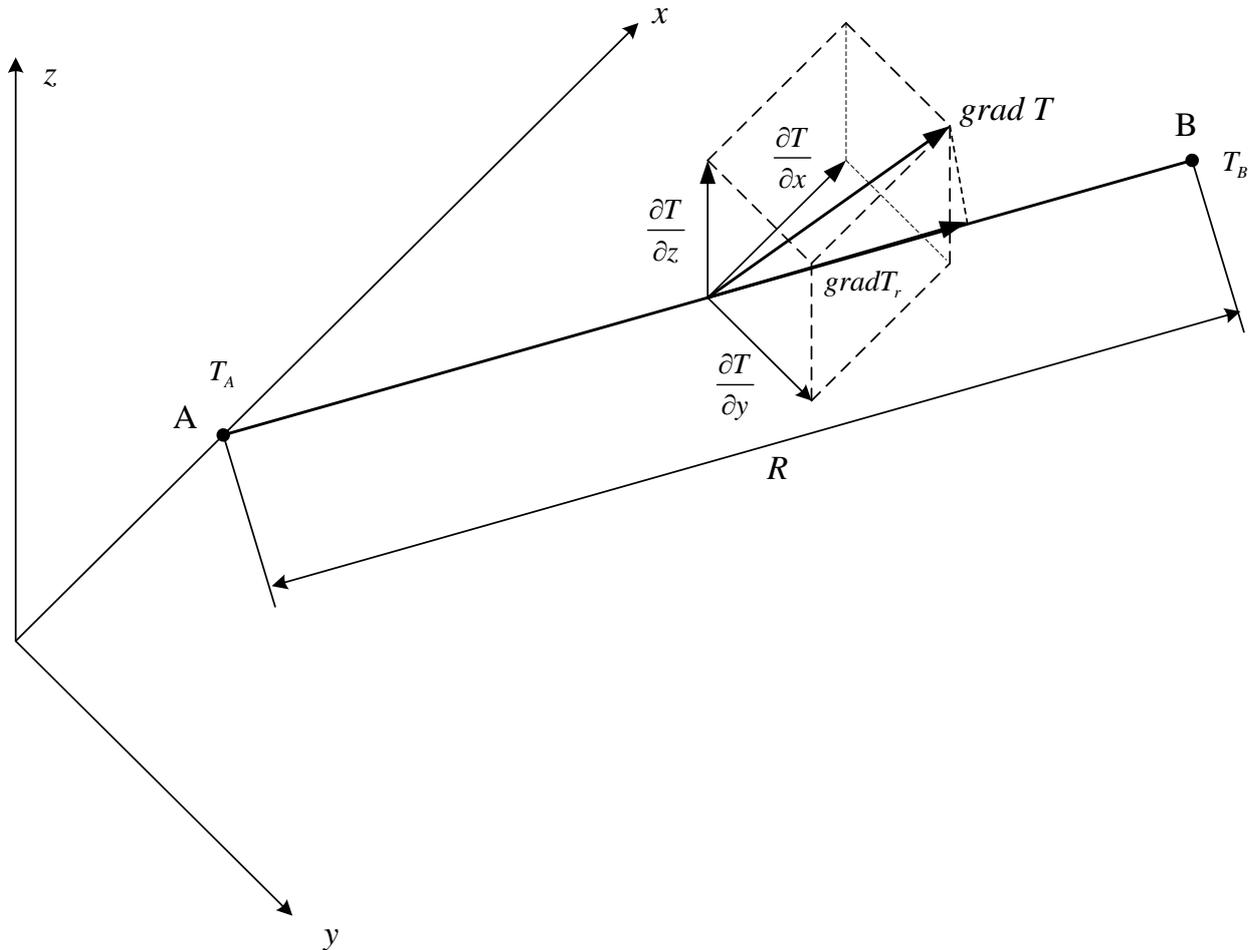


Рис. 2.3. Применение метода суперпозиции при расчете температурных полей

2.3. Методика численно-аналитического расчета процесса теплопередачи и стационарного температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонного изделия при его электротепловой обработке

Можно высказать предположение, что составляющие градиента температуры $\partial T/\partial x; \partial T/\partial y; \partial T/\partial z$ в любой точке объема материала могут быть определены посредством получения частных решений уравнения теплопереноса (2.2) в направлении каждой оси системы координат. Это позволит определять значения и

направления $grad T$, а также величину $grad T_r$ (рис. 2.3) и значение температуры в любой точке объема изделия, используя выражение (2.26). Однако основным препятствием в осуществлении такой процедуры расчета температурного поля являются значительные трудности с получением аналитического выражения для интеграла (2.27) и для его определения целесообразно использовать также численные методы. Поэтому предлагаемая методика расчета температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонного изделия при его электротепловой обработке, представляет собой сочетание аналитических и численных методов, что рассматривается в настоящее время, как одно из перспективных направлений использования средств вычислительной математики в строительной отрасли [99,100,115,116].

Для реализации указанной численно-аналитической методики расчета температурного поля в трехмерном пространстве удобно воспользоваться расчетной схемой, представленной на рис. 2.4. Объект, в объеме которого производится расчет температурного поля, имеет форму параллелепипеда (рис. 2.4) и представляет собой либо реальное изделие, например фундаментный блок, либо мысленно вырезанной его частью. Предполагается, что начальная точка системы координат расположена в центре объекта. Если предположить, что при выполнении электротепловой обработки этого объекта плотность объемного тепловыделения во всех точках объема материала одинакова и неизменна во времени:

$$q_{VT}(x, y, z, t) = q_{VT} = const, \quad (2.28)$$

а краевые условия на границах объекта будут иметь симметрию относительно осей системы координат, то в стационарном режиме температурное поле в материале будет иметь картину, также симметричную относительно каждой оси системы координат. При этом направление теплового потока на каждой из осей будет совпадать с направлением этой оси, а плотность теплового потока на поверхности тела (рис. 2.4) имеет значения $q_{s,l}$, $q_{s,b}$ и $q_{s,h}$ для осей x, y и z соответственно, определяемых граничными условиями.

В этом случае на основании (2.2) с учетом (2.3) можно записать систему одномерных дифференциальных уравнений, описывающую процесс теплопередачи вдоль осей системы координат:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_{VT}(x)}{c \cdot \rho}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q_{VT}(y)}{c \cdot \rho}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_{VT}(z)}{c \cdot \rho}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

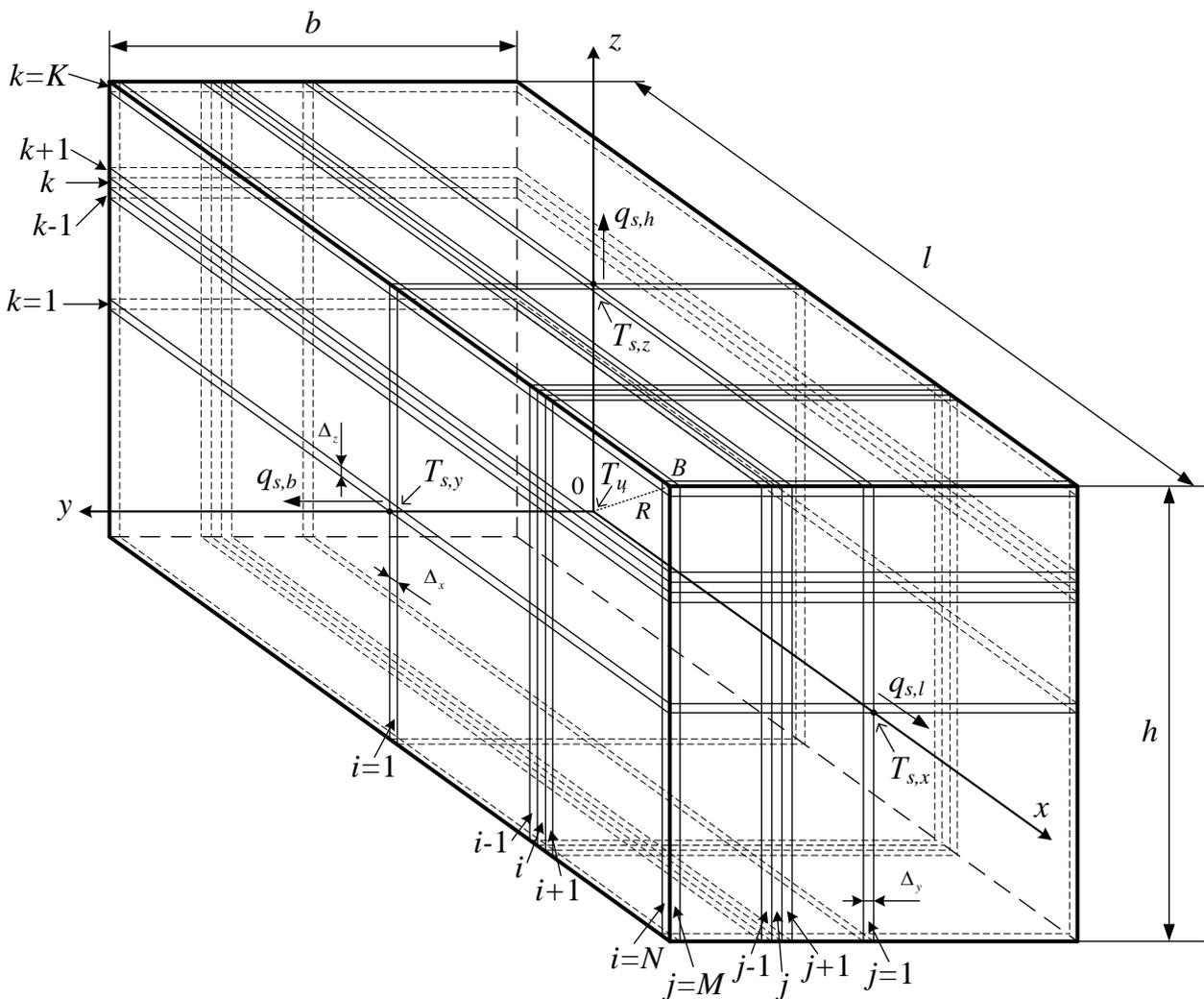


Рис. 2.4. Схема численно-аналитической методики расчета температурного поля в трехмерном пространстве

Граничные условия при решении этих уравнений в стационарном режиме определяются соотношениями (2.4), (2.6), которые дополняются условием

$$T_{Ц} = T_x(x=0) = T_y(y=0) = T_z(z=0), \quad (2.30)$$

т.е. при определении распределения температуры вдоль каждой из осей значение температуры в начальной точке $x=y=z=0$ (в начале системы координат – в центре рассматриваемого объекта – рис. 2.4) должно быть одинаковым. Кроме этого, к числу граничных условий относятся упомянутые выше значения плотности теплового потока $q_{s,l}$, $q_{s,b}$ и $q_{s,h}$, а также значения температуры T_{xl} , T_{yb} , T_{zh} , которые определяются условиями теплопереноса на поверхности объекта (рис. 2.4) в месте расположения и в направлении координатных осей. Порядок определения численных значений указанных параметров для некоторых частных и распространенных случаев будет рассмотрен далее.

Решение одномерных уравнений теплопереноса вида (2.29) для указанных условий известно и, в частности, приведено в [90,99,100]. С учетом этих сведений можно записать соотношения, описывающие изменение градиента температуры вдоль каждой оси:

$$\begin{aligned} gradT_x &= \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{2 \cdot q_{s,l}}{\lambda \cdot l} \cdot x, \\ gradT_y &= \frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{2 \cdot q_{s,b}}{\lambda \cdot b} \cdot y, \\ gradT_z &= \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{2 \cdot q_{s,h}}{\lambda \cdot h} \cdot z. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Изменение температуры вдоль каждой из осей определяется следующими формулами

$$\begin{aligned} T_x &= T_{sx} + \frac{q_{s,l}}{\lambda \cdot l} \cdot \left(\frac{l^2}{4} - x^2 \right), \\ T_y &= T_{sy} + \frac{q_{s,b}}{\lambda \cdot b} \cdot \left(\frac{b^2}{4} - y^2 \right), \\ T_z &= T_{sz} + \frac{q_{s,h}}{\lambda \cdot h} \cdot \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right). \end{aligned} \quad (2.32)$$

При этом условие (2.30) принимает вид

$$T_{Ц} = T_{sx} + \frac{q_{s,l} \cdot l}{\lambda \cdot 4} = T_{sy} + \frac{q_{s,b} \cdot b}{\lambda \cdot 4} = T_{sz} + \frac{q_{s,h} \cdot h}{\lambda \cdot 4}. \quad (2.33)$$

В некоторых случаях исследования температурных полей формулы (2.32) удобно выразить с учетом (2.32) в следующем виде

$$\begin{aligned} T_x &= T_{Ц} - \frac{q_{s,l} \cdot x^2}{\lambda \cdot l}, \\ T_y &= T_{Ц} - \frac{q_{s,b} \cdot y^2}{\lambda \cdot b}, \\ T_z &= T_{Ц} - \frac{q_{s,h} \cdot z^2}{\lambda \cdot h}, \end{aligned} \quad (2.34)$$

когда текущее значение температуры вдоль каждой из осей координат выражается через температуру в начальной точке координатной системы (в центре объекта).

Далее рассматриваемый объем (рис. 2.4) мысленно разбивается на тонкие слои, расположенные перпендикулярно осям координат и параллельно соответствующим плоскостям системы координат, с присвоением им порядковых номеров. Например, слои, перпендикулярные оси x и параллельные плоскости YOZ , имеют нумерацию от $i=1$ до $i=N$, слои, перпендикулярные оси y и параллельные XOZ , имеют нумерацию от $j=1$ до $j=M$, а слои, перпендикулярные оси z и параллельные плоскости XOY , нумеруются от $k=1$ до $k=K$. Таким образом, N, M и K – это число полученных в результате разбиения слоев в каждом из трех направлений, считая от начала системы координат. При этом в целях упрощения вычислений толщина всех слоев, полученных в одном направлении, принимается одинаковой и, согласно рис. 2.4, может быть определена по формулам

$$\Delta_x = \frac{l}{2N}, \quad \Delta_y = \frac{b}{2M}, \quad \Delta_z = \frac{h}{2K}. \quad (2.35)$$

Однако в общем случае толщина слоев, принадлежащих разным направлениям, может отличаться: $\Delta_x \neq \Delta_y \neq \Delta_z$. При этом, как будет показано ниже, в целях упрощения вычислений целесообразно обеспечить равенство $N=M=K$.

Для определения значения температуры в любой точке объема материала (рис. 2.4) с произвольными координатами согласно принципа, иллюстрируемого

рис. 2.3, необходимо иметь некоторую общую для всех расчетов базовую точку с известным значением температуры, относительно которой будут выполняться вычисления. Вполне очевидно, что в качестве такой точки удобно использовать начало системы координат, значение температуры $T_{Ц}$ (см. рис. 2.4) в которой нетрудно предварительно определить с использованием соотношения (2.33).

Процесс вычислений удобно представить на примере расчета температуры вдоль прямой OB , соединяющей центр системы координат и вершину объекта (параллелепипеда – рис. 2.4). Длину отрезка OB , согласно рис. 2.4, нетрудно определить с помощью соотношения

$$R = \sqrt{\left[\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2\right]}. \quad (2.36)$$

Для наглядной иллюстрации вычислений расчетную схему, приведенную на рис. 2.4, целесообразно представить в более удобном виде, как показано на рис. 2.5. Если при разбиении объема фигуры рис. 2.4 на слои выполнено равенство $N=M=K$, эти слои будут вырезать на участке OB отрезки одинаковой величины, которую, исходя из геометрического подобия, с учетом (2.36) можно определить по формуле

$$\Delta_r = \sqrt{(\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2)}. \quad (2.37)$$

Для слоев, примыкающих к точке начала осей координат ($i=j=k=1$), можно посредством интегрирования выражений (2.31) определить величину изменения температуры вдоль каждой из осей на участке равной толщине слоя:

$$\begin{aligned} \Delta T_{x,1} &= \int_0^{\Delta_x} \text{grad}T_x dx = -\frac{q_{s,l}\Delta_x^2}{\lambda \cdot l}, \\ \Delta T_{y,1} &= \int_0^{\Delta_y} \text{grad}T_y dy = -\frac{q_{s,b}\Delta_y^2}{\lambda \cdot b}, \\ \Delta T_{z,1} &= \int_0^{\Delta_z} \text{grad}T_z dz = -\frac{q_{s,h}\Delta_z^2}{\lambda \cdot h}. \end{aligned} \quad (2.38)$$

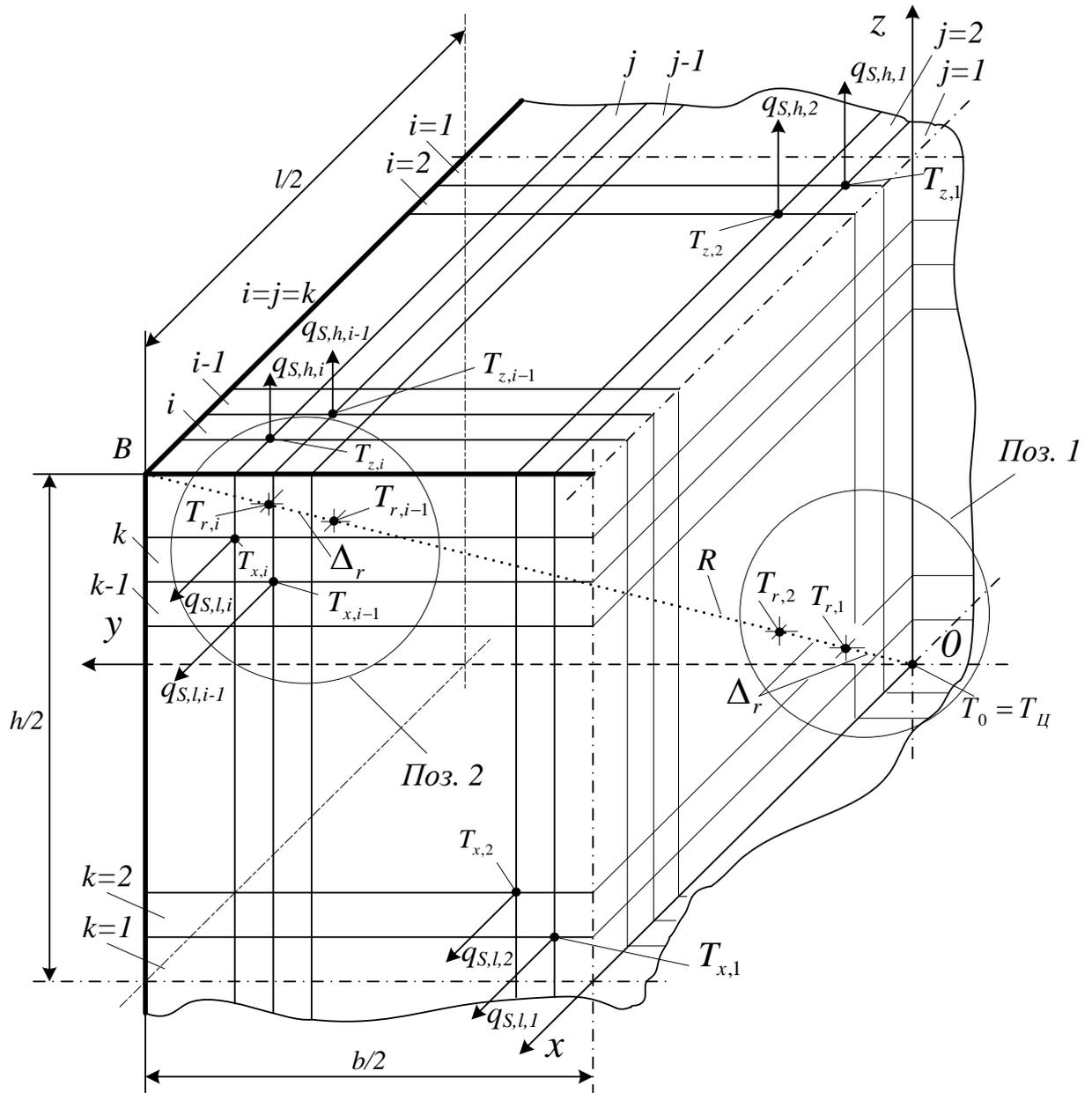


Рис. 2.5 Расчетная схема рис. 2.4 в увеличенном виде

Это позволяет определить изменение температуры на первом участке (примыкающему к началу системы координат) отрезка R :

$$\Delta T_{r,1} = \sqrt{(\Delta T_{x,1}^2 + \Delta T_{y,1}^2 + \Delta T_{z,1}^2)}, \quad (2.39)$$

а также значение температуры в конце этого участка (рис. 2.5), которое с учетом знака в правой части уравнений (2.38) определяется по формуле

$$T_{r,1} = T_{Ц} - \Delta T_{r,1}, \quad (2.40)$$

Следующий шаг вычислений – это определение по аналогии с первым слоем изменения температуры во втором слое, считая от начала координат, в направлении каждой из осей. Однако следует учитывать то обстоятельство, что по мере удаления от начала системы координат будут изменяться параметры частных решений системы одномерных уравнений (2.29) вследствие изменения граничных условий. Например, при получении частного решения вдоль прямой, параллельной оси x , оно будет справедливо при изменении этой координаты в пределах от $x=0$ до $x=l/2$ при значениях других координат $y=\Delta_y$ и $z=\Delta_z$, при определении частного решения вдоль оси y этот параметр будет изменяться от $y=0$ до $y=b/2$ при $x=\Delta_x$ и $z=\Delta_z$, и, наконец, при получении частного решения вдоль оси z этот параметр колеблется в пределах от $z=\Delta_z$ до $z=h/2$ при $y=\Delta_y$ и $x=\Delta_x$ (рис. 2.5). В этом случае граничные условия можно описать следующим образом. Значение температуры в начальной точке каждой прямой (рис. 2.5) может быть определено с использованием соотношений

$$\begin{aligned} T_{x,1}(x=0) &= T(x=0, y=\Delta_y, z=\Delta_z), \\ T_{y,1}(y=0) &= T(x=\Delta_x, y=0, z=\Delta_z), \\ T_{z,1}(z=0) &= T(x=\Delta_x, y=\Delta_y, z=0), \end{aligned} \quad (2.41)$$

где T – значение температуры в точке с координатами, указанными в скобках. Из (2.41) нетрудно сделать вывод, что каждая из этих точек лежит на поверхности соответствующей координатной плоскости. Указанное обстоятельство позволяет достаточно просто определить численное значение этих параметров по известной величине температуры $T_{Ц}$ с помощью соотношений

$$\begin{aligned} T_{x,1}(x=0) &= T_{Ц} - \sqrt{(\Delta T_{y,1})^2 + (\Delta T_{z,1})^2}, \\ T_{y,1}(y=0) &= T_{Ц} - \sqrt{(\Delta T_{x,1})^2 + (\Delta T_{z,1})^2}, \\ T_{z,1}(z=0) &= T_{Ц} - \sqrt{(\Delta T_{x,1})^2 + (\Delta T_{y,1})^2}. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Как показано выше, другими обязательными показателями, характеризующими граничные условия, являются значения плотности теплового потока $q_{S,l,1}$, $q_{S,b,1}$ и

$q_{s,h,l}$, а также значения температуры $T_{xl,1}$, $T_{yb,1}$, $T_{zh,1}$, которые определяются условиями теплопереноса на поверхности объекта (рис. 2.5) в месте расположения и в направлении соответствующей прямой, вдоль которой определяется частное решение уравнений (2.29). Частное решение уравнений (2.29) для определения изменения градиента температуры вдоль каждой прямой по аналогии с (2.31) будет иметь вид

$$\begin{aligned} \text{grad}T_{x,1} &= -\frac{2 \cdot q_{s,l,1}}{\lambda \cdot l} \cdot x, \\ \text{grad}T_{y,1} &= -\frac{2 \cdot q_{s,b,1}}{\lambda \cdot b} \cdot y, \\ \text{grad}T_{z,1} &= -\frac{2 \cdot q_{s,h,1}}{\lambda \cdot h} \cdot z. \end{aligned} \quad (2.43)$$

По аналогии с (2.32) нетрудно записать формулы, описывающие закон изменения температуры вдоль каждой прямой:

$$\begin{aligned} T_{x,1} &= T_{sx,1} + \frac{q_{s,l,1}}{\lambda \cdot l} \cdot \left(\frac{l^2}{4} - x^2 \right), \\ T_{y,1} &= T_{sy,1} + \frac{q_{s,b,1}}{\lambda \cdot b} \cdot \left(\frac{b^2}{4} - y^2 \right), \\ T_{z,1} &= T_{sz,1} + \frac{q_{s,h,1}}{\lambda \cdot h} \cdot \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right). \end{aligned} \quad (2.44)$$

Эти формулы (2.44) аналогично соотношениям (2.34) можно представить и в другом виде:

$$\begin{aligned} T_{x,1} &= T_{Ц} - \sqrt{(\Delta T_{y,1}^2 + \Delta T_{z,1}^2)} - \frac{q_{s,l,1} \cdot x^2}{\lambda \cdot l}, \\ T_{y,1} &= T_{Ц} - \sqrt{(\Delta T_{x,1}^2 + \Delta T_{z,1}^2)} - \frac{q_{s,b,1} \cdot y^2}{\lambda \cdot b}, \\ T_{z,1} &= T_{Ц} - \sqrt{(\Delta T_{x,1}^2 + \Delta T_{y,1}^2)} - \frac{q_{s,h,1} \cdot z^2}{\lambda \cdot h}. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Выражение (2.33) в этом случае и в последующих вычислениях с учетом (2.42) превращается в систему из трех уравнений:

$$\begin{aligned} T_{x,1}(x=0) &= T_{Ц} - \sqrt{(\Delta T_{y,1}^2 + \Delta T_{z,1}^2)} = T_{sx,1} + \frac{q_{s,l,1} \cdot l}{\lambda \cdot 4}, \\ T_{y,1}(y=0) &= T_{Ц} - \sqrt{(\Delta T_{x,1}^2 + \Delta T_{z,1}^2)} = T_{sy,1} + \frac{q_{s,b,1} \cdot b}{\lambda \cdot 4}, \\ T_{z,1}(z=0) &= T_{Ц} - \sqrt{(\Delta T_{x,1}^2 + \Delta T_{y,1}^2)} = T_{sz,1} + \frac{q_{s,h,1} \cdot h}{\lambda \cdot 4}. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Знание закона изменения градиента температуры, который описывается соотношениями (2.43), позволяет по аналогии с (2.38) и с учетом изменения пределов интегрирования определить изменение температуры вдоль каждой прямой в пределах толщины второго слоя (рис. 2.5):

$$\begin{aligned} \Delta T_{x,2} &= \int_{\Delta_x}^{2\Delta_x} \text{grad} T_{x,1} dx = -\frac{3q_{s,l,1} \Delta_x^2}{\lambda \cdot l}, \\ \Delta T_{y,2} &= \int_{\Delta_y}^{2\Delta_y} \text{grad} T_{y,1} dy = -\frac{3q_{s,b,1} \Delta_y^2}{\lambda \cdot b}, \\ \Delta T_{z,2} &= \int_{\Delta_z}^{2\Delta_z} \text{grad} T_{z,1} dz = -\frac{3q_{s,h,1} \Delta_z^2}{\lambda \cdot h}, \end{aligned} \quad (2.47)$$

а также изменение температуры на втором участке прямой R (рис. 2.5) таким же образом, как это представлено в выражении (2.39):

$$\Delta T_{r,2} = \sqrt{(\Delta T_{x,2}^2 + \Delta T_{y,2}^2 + \Delta T_{z,2}^2)}. \quad (2.48)$$

Далее, как было показано на примере первого слоя (2.40), в соответствии с рис. 2.5 уже нетрудно определить значение температуры в конце второго участка

$$T_{r,2} = T_{r,1} - \Delta T_{r,2} = T_{Ц} - \Delta T_{r,1} - \Delta T_{r,2}. \quad (2.49)$$

Выполняя расчеты, представленные на примере второго слоя, для третьего и последующих слоев, можно достичь конечной точки B отрезка R (рис. 2.5) с

получением значения температуры в этой точке при заданных граничных условиях. Другим результатом расчетов являются зависимости изменения температуры и градиента температуры вдоль отрезка R . Вполне очевидно, что подобные расчеты целесообразно выполнять с помощью программируемых вычислительных средств с организацией однотипных вычислений в циклическом режиме, когда параметром очередного цикла расчетов является номер слоя, для которого этот расчет выполняется. В этом случае используемые расчетные соотношения из соображений удобства программирования целесообразно записать в общем виде на примере произвольного, i -го по счету слоя (рис. 2.5). Тогда соотношения (2.41) и (2.42), определяющие начальные условия по величине температуры можно представить в следующем виде

$$\begin{aligned}
 T_{x,i-1}(x=0) &= T(x=0, y=\Delta_y(i-1), z=\Delta_z(i-1)) = T_{\text{Ц}} - \sum_{n=1}^{n=i-1} \sqrt{(\Delta T_{y,n}^2 + \Delta T_{z,n}^2)}, \\
 T_{y,i-1}(y=0) &= T(x=\Delta_x(i-1), y=0, z=\Delta_z(i-1)) = T_{\text{Ц}} - \sum_{n=1}^{n=i-1} \sqrt{(\Delta T_{x,n}^2 + \Delta T_{z,n}^2)}, \\
 T_{z,i-1}(z=0) &= T(x=\Delta_x(i-1), y=\Delta_y(i-1), z=0) = T_{\text{Ц}} - \sum_{n=1}^{n=i-1} \sqrt{(\Delta T_{x,n}^2 + \Delta T_{y,n}^2)},
 \end{aligned} \tag{2.50}$$

Граничные условия на поверхности объекта (рис. 2.5) следует обозначить: $q_{S,l,i-1}$, $q_{S,b,i-1}$ и $q_{S,h,i-1}$ – для значений плотности теплового потока и $T_{xl,i-1}$, $T_{yb,i-1}$, $T_{zh,i-1}$ – для значений температуры на этой поверхности. Решение системы дифференциальных уравнений (2.29) вида (2.43) и (2.44) следует записать:

$$\begin{aligned}
 \text{grad}T_{x,i-1} &= -\frac{2 \cdot q_{sl,i-1}}{\lambda \cdot l} \cdot x, \\
 \text{grad}T_{y,i-1} &= -\frac{2 \cdot q_{sb,i-1}}{\lambda \cdot b} \cdot y, \\
 \text{grad}T_{z,i-1} &= -\frac{2 \cdot q_{sh,i-1}}{\lambda \cdot h} \cdot z.
 \end{aligned} \tag{2.51}$$

– для определения градиентов температуры и

$$\begin{aligned}
T_{x,i-1} &= T_{sx,i-1} + \frac{q_{sl,i-1}}{\lambda \cdot l} \cdot \left(\frac{l^2}{4} - x^2 \right), \\
T_{y,i-1} &= T_{sy,i-1} + \frac{q_{sb,i-1}}{\lambda \cdot b} \cdot \left(\frac{b^2}{4} - y^2 \right), \\
T_{z,i-1} &= T_{sz,i-1} + \frac{q_{sh,i-1}}{\lambda \cdot h} \cdot \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right).
\end{aligned} \tag{2.52}$$

– для определения температуры. Система уравнений (2.46) приобретает следующий вид

$$\begin{aligned}
T_{x,i-1}(x=0) &= T_{Ц} - \sqrt{(\Delta T_{y,i-1}^2 + \Delta T_{z,i-1}^2)} = T_{sx,i-1} + \frac{q_{sl,i-1} \cdot l}{\lambda \cdot 4}, \\
T_{y,i-1}(y=0) &= T_{Ц} - \sqrt{(\Delta T_{x,i-1}^2 + \Delta T_{z,i-1}^2)} = T_{sy,i-1} + \frac{q_{sb,i-1} \cdot b}{\lambda \cdot 4}, \\
T_{z,i-1}(z=0) &= T_{Ц} - \sqrt{(\Delta T_{x,i-1}^2 + \Delta T_{y,i-1}^2)} = T_{sz,i-1} + \frac{q_{sh,i-1} \cdot h}{\lambda \cdot 4}.
\end{aligned} \tag{2.53}$$

Выражения вида (2.47), позволяющие определить изменение температуры в пределах i -го слоя, будут иметь следующее представление

$$\begin{aligned}
\Delta T_{x,i} &= \int_{(i-1)\Delta_x}^{i\Delta_x} grad T_{x,i-1} dx = -\frac{q_{sl,i-1} \Delta_x^2}{\lambda \cdot l} (2i-1), \\
\Delta T_{y,i} &= \int_{(i-1)\Delta_y}^{i\Delta_y} grad T_{y,i-1} dy = -\frac{q_{sb,i-1} \Delta_y^2}{\lambda \cdot b} (2i-1), \\
\Delta T_{z,i} &= \int_{(i-1)\Delta_z}^{i\Delta_z} grad T_{z,i-1} dz = -\frac{q_{sh,i-1} \Delta_z^2}{\lambda \cdot h} (2i-1).
\end{aligned} \tag{2.54}$$

Тогда по аналогии с выражениями (2.48) и (2.49) изменение температуры на i -м участке отрезка R (рис. 2.5) и температуру $T_{r,i}$ в конце этого участка и величину

(модуль) градиента температуры $gradT_i$ на нем можно будет определить по формулам

$$\Delta T_{r,i} = \sqrt{(\Delta T_{x,i}^2 + \Delta T_{y,i}^2 + \Delta T_{z,i}^2)},$$

$$T_{r,i} = T_{r,i-1} - \Delta T_{r,i} = T_{Ц} - \sum_{n=1}^{n=i} \Delta T_{r,n}, \quad (2.55)$$

$$gradT_{x,i} = \frac{\Delta T_{x,i}}{\Delta_x}, \quad gradT_{y,i} = \frac{\Delta T_{y,i}}{\Delta_y}, \quad gradT_{z,i} = \frac{\Delta T_{z,i}}{\Delta_z},$$

$$gradT_i = \sqrt{(gradT_{x,i})^2 + (gradT_{y,i})^2 + (gradT_{z,i})^2}.$$

Особенностью предложенной методики является то, что решения (2.32), (2.34), (2.44), (2.45), (2.52) системы дифференциальных уравнений (2.29), описывающие закон изменения температуры вдоль осей координат и вдоль прямых, параллельных этим осям) непосредственного участия в достижении конечного результата, т.е. определении температуры в заданной точке пространства, не принимают. Для этого используются только соотношения (2.31), (2.43) и (2.51), описывающие закон изменения градиента температуры, и упомянутые соотношения являются дополнительным результатом расчетов. Тем не менее, они также представляют интерес с точки зрения проверки правильности расчетов, анализа характера температурных полей, возникающих в объеме изделия, а также наглядного, визуального их представления.

2.4. Особенности практического применения расчетных методик

При описании методики численно–аналитического расчета температурного поля в трехмерном пространстве объема изделия (разд. 2.3) она была рассмотрена на примере расчета температуры в точке В, расположенной на вершине тела (параллелепипеда), в объеме которого определяется температурное поле (рис. 2.4, 2.5). Необходимо иметь представление об особенностях выполнения

вычислений в случае, если рассматриваемая точка будет расположена в произвольном месте внутри этого тела. Расчетная схема для такой ситуации представлена на рис. 2.6, где расположение этой точки C характеризуется координатами X_C , Y_C , Z_C , а R_C – кратчайшее расстояние от начала системы координат до точки A по аналогии с R для точки B ($R_C < R$), величину которого нетрудно определить из соотношения

$$R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2 + Z_C^2}. \quad (2.56)$$

В этом случае для определения температуры вдоль отрезка R_C и в точке C с помощью численно-аналитической методики расчета (разд. 2.3) нет необходимости разбивать на тонкие слои весь объем рассматриваемого тела, а следует ограничиться лишь той его частью, которая соответствует изменению координат в следующих пределах: от $x=0$ до $x=X_C$, $y=0$ до $y=Y_C$, $z=0$ до $z=Z_C$ (рис. 2.6). При этом, как и ранее, в целях упрощения вычислений целесообразно соблюдение условия $N=M=K$, в результате чего толщину слоев разбиения по аналогии с (2.35) можно определить с помощью формул

$$\begin{aligned} \Delta_x &= \frac{X_C}{N}, \\ \Delta_y &= \frac{Y_C}{M}, \\ \Delta_z &= \frac{Z_C}{K}. \end{aligned} \quad (2.57)$$

Далее процесс вычислений ничем не отличается от той процедуры, которая описана в разд. 2.3 с единственной разницей в том, что завершается он при достижении не точки B (рис. 2.4, 2.5), а заданной точки C (рис. 2.6). Характерно, что сохраняется порядок нахождения частных решений, описываемых в общем случае соотношениями (2.51) и (2.52), т.е. они определяются по-прежнему из краевых условий на границах всего объекта (рис. 2.4), а не той его части, которая подвергается разбиению на слои (рис. 2.6).

Предложенные методики расчета температурных полей (разд. 2.1–2.3) представляют собой значительно более простой инструмент, чем существующие

численно аналитические методы, основанные на использовании метода конечных элементов или его разновидностей [115,116]. Тем не менее, их практическое употребление подразумевает использование современной вычислительной техники и методов компьютерного моделирования. Это существенно расширяет возможности таких методик. Например, изменяя программными средствами координаты точки C (рис. 2.6) можно получать распределение температуры или градиента температуры вдоль любой произвольных траектории и поверхности внутри заданного объекта (рис. 2.4), определять линии или поверхности, имеющие одинаковые значения температуры (изотермы) или одинаковые значения градиента температуры, а также решать другие задачи, связанные с исследованием температурных полей в объеме железобетонных изделий.

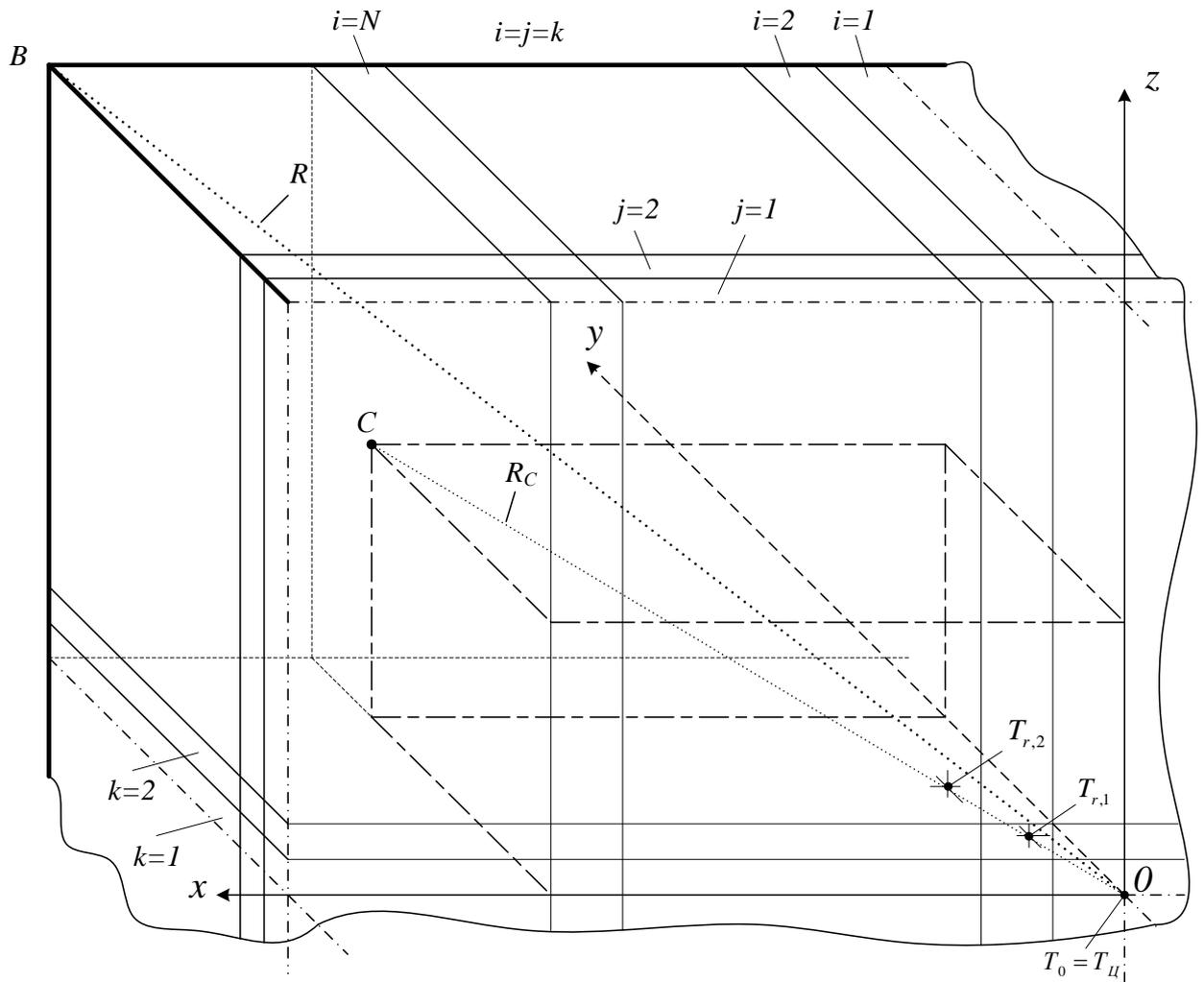


Рис. 2.6. Расчетная схема для определения температуры в произвольной точке C с помощью численно-аналитической методики

Одно из важнейших назначений сведений о распределении температуры в объеме материала, получаемых в результате применения предложенных расчетных методик, заключается в определении температурных условий твердения бетона и значения его механической прочности в ходе электротепловой обработки с помощью существующих математических моделей [100]. Знание градиентов температуры позволяет оценить риски повреждения материала внутренними механическими напряжениями, возникающими в объеме материала вследствие неоднородности температурного поля [100,112] и в случае необходимости принять меры по устранению опасности такого повреждения.

Как показывает анализ предложенных расчетных методик, обязательным условием их успешного применения, т.е. достоверного определения значений температуры и градиента температуры, является обоснованное и точное определение граничных условий: величины плотности теплового потока q_s и температуры T_s на поверхности рассматриваемого объекта (см. рис. 2.1, 2.2, и 2.4). Учитывая, что объектами исследования температурных полей в объеме материала являются железобетонные изделия, находящиеся при электротепловой обработке в опалубке, выполненной из диэлектрических материалов и снабженной теплоизоляционным слоем (ламинированная фанера, пенопласт), для нахождения этих граничных параметров целесообразно воспользоваться методикой рассмотренной в [100,119]. Исходя из предположения, что поверхность опалубки имеет естественное охлаждение, плотность теплового потока на этой поверхности определяется из соотношения [100,119]

$$q_s = \frac{(T_s - T_o) - \left(\frac{q_s}{4} \right)^{1.13}}{S_\lambda}, \quad (2.58)$$

где плотность теплового потока вдоль на поверхности опалубки, Вт/м², будет равна плотности этого потока на поверхности изделия и может быть определена также в Вт/м² по формуле для вертикально охлаждаемой стенки [1,2,100,119]:

$$q_s = 4 \cdot (T_{нар} - T_o)^{1.13}, \quad (2.59)$$

где T_o – температура окружающей среды (воздуха); $T_{нар}$ – температура поверхности опалубки; H_i и λ_i – толщина и коэффициент теплопроводности каждого слоя опалубки (ламинированная фанера или стеклопластик, теплоизоляционный материал, наружная обшивка), $S_\lambda = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{\lambda_i}$ – параметр, который можно определить, как термическое сопротивление стенки опалубки тепловому потоку.

Член формулы (2.58) $q_s^{1/4}$, как показано в [100], имеет размерность температуры, К, т.к. получается в результате использования эмпирической формулы (2.59).

С другой стороны, связь между температурой на поверхности опалубки $T_{нар}$ и температурой на поверхности изделия T_s согласно определяется соотношением [100,119]

$$T_s = T_{нар} + q_s \cdot S_\lambda, \quad (2.60)$$

откуда

$$T_{нар} = T_s - q_s \cdot S_\lambda. \quad (2.61)$$

Из (2.58) следует, что не удастся получить выражение для определения q_s в явном виде, а расчет этой величины придется выполнять с помощью этой формулы посредством итерационных вычислений при фиксированных значениях T_s и T_o [100].

Из соотношения (2.58) нетрудно выразить величину температуры на поверхности изделия:

$$T_s = S_\lambda q_s + T_o + \left(\frac{q_s}{4} \right)^{1/13}. \quad (2.62)$$

Это выражение целесообразно использовать при расчете температурных полей во всех рассмотренных выше случаях (разд. 2.1, 2.3). Наиболее наглядно это можно проиллюстрировать на примере численно-аналитического расчета трехмерного температурного поля (рис. 2.4, 2.5). Если воспользоваться обозначениями

рис. 2.4, 2.5, то, например, для оси x уравнение (2.62) необходимо записать в следующем виде

$$T_{S,l} = S_{\lambda} q_{S,l} + T_o + \left(\frac{q_S}{4} \right)^{1.13}. \quad (2.63)$$

С другой стороны, это значение температуры можно выразить из (2.34), полагая $x=l/2$:

$$T_{S,l} = T_{Ц} - \frac{q_{S,l} \cdot l}{4\lambda}. \quad (2.64)$$

Приравняв правые части (2.63) и (2.64) можно выразить плотность теплового потока на поверхности объекта (рис. 2.4)

$$q_{S,l} = \frac{(T_{Ц} - T_o) - \left(\frac{q_{S,l}}{4} \right)^{1.13}}{\left(S_{\lambda} + l/4\lambda \right)}. \quad (2.65)$$

Формула (2.65) по своей структуре аналогична соотношению (2.58) только определение плотности теплового потока на границе объекта производится с использованием значения температуры $T_{Ц}$ в центре рассматриваемого объекта (рис. 2.4), т.е. в начальной точке системы координат, где температура имеет наибольшее значение. Определение $q_{S,l}$ в этом случае осуществляется таким же способом, как и в предыдущем – посредством итерационных вычислений. Знание $q_{S,l}$ позволяет с помощью формулы (2.64) рассчитать второй граничный параметр – $T_{S,l}$, без которого невозможны дальнейшие вычисления.

Уравнения, аналогичные (2.64) и (2.65), можно записать и для других осей (рис. 2.4, 2.5):

$$T_{S,b} = T_{Ц} - \frac{q_{S,b} \cdot b}{4\lambda}, \quad (2.66)$$

$$T_{S,h} = T_{Ц} - \frac{q_{S,h} \cdot h}{4\lambda}.$$

$$q_{S,b} = \frac{(T_{II} - T_o) - \left(\frac{q_{S,b}}{4} \right)^{1.13}}{\left(S_\lambda + \frac{b}{4\lambda} \right)}, \quad (2.67)$$

$$q_{S,h} = \frac{(T_{II} - T_o) - \left(\frac{q_{S,h}}{4} \right)^{1.13}}{\left(S_\lambda + \frac{h}{4\lambda} \right)}.$$

Использование формул (2.64) – (2.67) для определения граничных условий имеет явные преимущества по сравнению с соотношением (2.58). Действительно, численное значение выражений $\left(S_\lambda + \frac{l}{4\lambda} \right)$, $\left(S_\lambda + \frac{b}{4\lambda} \right)$ и $\left(S_\lambda + \frac{h}{4\lambda} \right)$ стоящих в знаменателе, нетрудно определить, исходя из конструкции опалубки, объекта электротепловой обработки и теплофизических параметров материалов. Значение температуры окружающей среды обычно определяется производственными условиями, например, для зимнего периода можно рекомендовать $T_o = 10$ °С. Максимальная температура нагрева материала в процессе тепловой обработки T_{II} обычно задается технологическими картами или техническими условиями этой стадии технологического процесса изготовления железобетонных изделий.

Вполне очевидно, что описанный способ необходимо применять для определения граничных условий частных решений ($q_{S,l,i}$, $q_{S,b,i}$, $q_{S,h,i}$ и $T_{xl,i}$, $T_{yb,i}$, $T_{zh,i}$ – рис. 2.5) в ходе расчета трехмерного температурного поля.

2.5. Выводы по гл.2

1. Предложенные методики расчета температурных полей в объеме материала железобетонных изделий в ходе электротепловой обработки охватывают достаточно широкий круг практических случаев использования такого технологического процесса на предприятии сборного железобетона.

2. Эти методики являются обязательной составной частью общей методологии разработки, исследования и применения процессов электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты [90,100] и вносят значительный вклад в дальнейшее развитие, уточнение и совершенствование этой методологии.
3. Предложенные расчетные методики являются оригинальным, не имеющим аналогов, научным продуктом, т.к. в них впервые при вычислении характеристик температурного поля в объеме материала учитывается неравномерность объемного тепловыделения, а также предложен, обоснован и разработан способ расчета температурного поля в трехмерном пространстве, основанный на определении и суперпозиции градиентов температуры.
4. Наряду с другими уже известными методиками, теоретические разработки, представленные в настоящей главе, имеют большое практическое значение, т.к. являются эффективным инструментом разработки и применения процессов электротепловой обработки достаточно широкого набора распространенных изделий предприятий сборного железобетона.

Глава 3. Исследование параметров и характеристик электротепловой обработки при изготовлении железобетонных изделий теоретическими методами

При наличии эффективного инструмента разработки и исследования процессов ЭТО токами повышенной частоты в виде предложенной ранее методологии изучения таких процессов [90,100] и дополненной разработанными методиками расчета температурных полей в объеме железобетонных изделий (гл. 2) имеет место возможность исследования характеристик и показателей таких полей методами компьютерного моделирования. Это позволит выбрать рациональную конструкцию технологического оборудования и режимы его работы при наименьших затратах сил и времени.

3.1. Исследование характеристик температурного поля в объеме обрабатываемого железобетонного изделия в процессе ЭТО при неоднородном тепловыделении

При исследовании влияния различных факторов на характер температурных полей, как показывают результаты предыдущих теоретических и экспериментальных исследований [90,100], нередко бывает достаточно выполнить теоретические оценки применительно к наиболее простым и наглядным примерам. К числу таких примеров можно, по-видимому, отнести изучение влияния неоднородности тепловыделения в ходе ЭТО на характер температурного поля. Действительно, в этом случае не играет роли вид температурного поля: одномерное, двух- или трехмерное поле, важно установить связь между характером неоднородности тепловыделения и степенью однородности или неоднородности температурного поля. Причем такие оценки имеют практическое значение, т.к. при осуществлении ЭТО достаточно часто присутствуют участки в объеме материала, где в силу разных причин возникает

неоднородность тепловыделения и необходимо оценивать опасность такой ситуации [113].

Методика расчета характеристик стационарных температурных полей при неоднородном тепловыделении, основанная на решении уравнения теплопереноса вдоль одной из осей системы координат (рис. 2.1), представлена в разд. 2.1. Эта методика позволяет рассчитывать изменение температуры и градиента температуры вдоль оси x при различном характере изменения объемного тепловыделения в направлении этой оси.

С использованием формул (2.9) и (2.10) были получены расчётные зависимости для температуры и градиента температуры, которые представлены на рис. 3.1 и рис. 3.2, применительно к электротепловой обработке железобетонного изделия при $\ell = 1$ м, $\lambda = 2,6$ Вт/мК, характерном для стационарного режима (изотермическая стадия обработки) значении $q_0 = 100$ Вт/м³ [119], и при неизменном значении $T_0 = 60$ °С (рис. 1). Полученные результаты (рис. 3.1 и рис. 3.2) свидетельствуют о значительном влиянии на температурные характеристики коэффициента β , определяющего вид и степень изменения тепловыделения вдоль оси x , т.е. в направлении теплового потока в объёме вещества (2.7). Наиболее сильно этот фактор влияет на величину градиента температуры (рис. 3.1), так как при изменении β от -2 до 1 максимальное значение градиента температуры увеличивается приблизительно в 6 раз, достигая опасных значений [112].

Полученные зависимости (рис. 3.1, рис. 3.2) позволяют сделать вывод о том, что однородное выделение тепла ($\beta=0$) вовсе не означает получение однородного температурного поля. Более благоприятным для повышения однородности температурного поля и снижения градиентов температуры является вариант, когда имеет место уменьшение тепловыделения (2.7) в направлении теплового потока ($\beta < 0$), т.е. вдоль оси x ($\beta < 0$).

Как отмечено в разд. 2.1, одним из распространенных случаев возникновения неоднородного тепловыделения в процессе ЭТО является ситуация, когда такой обработке подвергается изделие переменной толщины (рис. 2.2). В этом случае

распределение температуры и градиента температуры может быть найдено с помощью формул (2.22) и (2.24).

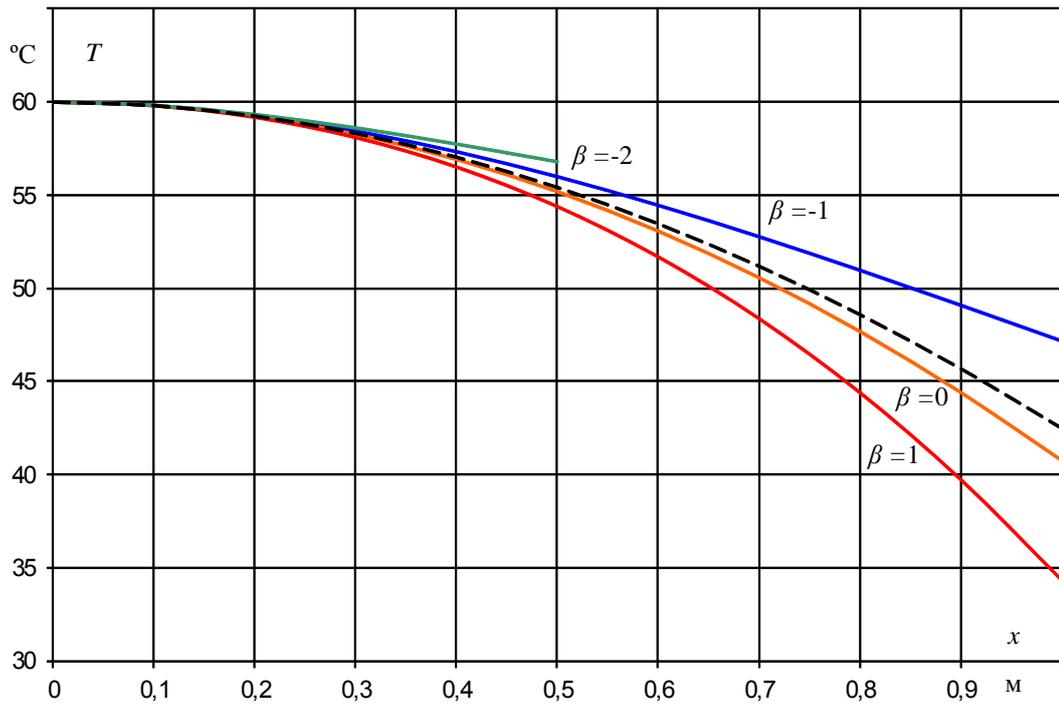


Рис. 3.1. Распределение температуры по оси x

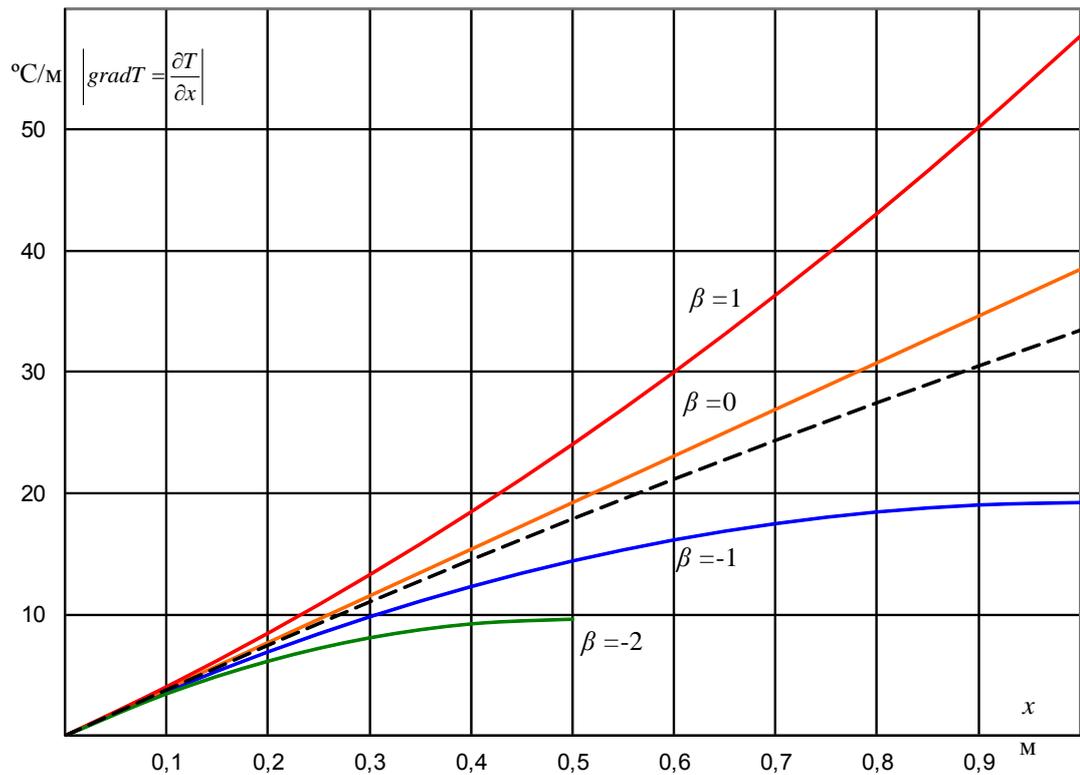


Рис. 3.2. Распределение градиента температуры по оси x

Результаты расчётов с использованием этих формул для $d_0 = 10$ см, $d_m = 12$ см, $l = 1$ м и прежнего значения $q_0 = 100$ Вт/м³ представлены также на рис. 3.1 и рис. 3.2 (пунктирные линии). Они позволяют сделать вывод, что и в этом случае (рис. 2.2) обеспечивается более однородное температурное поле, чем при однородном выделении тепла (рис. 2.1, $\beta=0$).

Одновременно, нельзя не отметить, что согласно полученным результатам (рис. 3.1 и 3.2) полное устранение неоднородности температурного поля посредством управления электрическим полем и объемным тепловыделением представляет весьма сложную задачу. С другой стороны, существенного снижения градиентов температуры по абсолютному значению согласно (2.10) и (2.24) можно достичь уменьшением значения q_0 . Это, как показано в [100,119,124], можно получить посредством уменьшения теплопотерь с поверхности обрабатываемого изделия за счет улучшения параметров теплоизоляции.

3.2. Программно-алгоритмическая реализация методики расчета характеристик температурного поля в трехмерном пространстве объема обрабатываемого железобетонного изделия в процессе ЭТО

Предложенная в настоящей работе (разд. 2.3 и 2.4) методика численно-аналитического расчета характеристик стационарного температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонного изделия при его электротепловой обработке является более простым инструментом решения подобных задач по сравнению традиционными методами, например методом конечных элементов и его разновидностей. Тем не менее, использование этой методики требует обязательного применения вычислительной техники посредством соответствующей программно-алгоритмической реализации. Поэтому на основании описания методики (разд. 2.3 и 2.4) был разработан алгоритм ее реализации, который представлен на рис. 3.3.

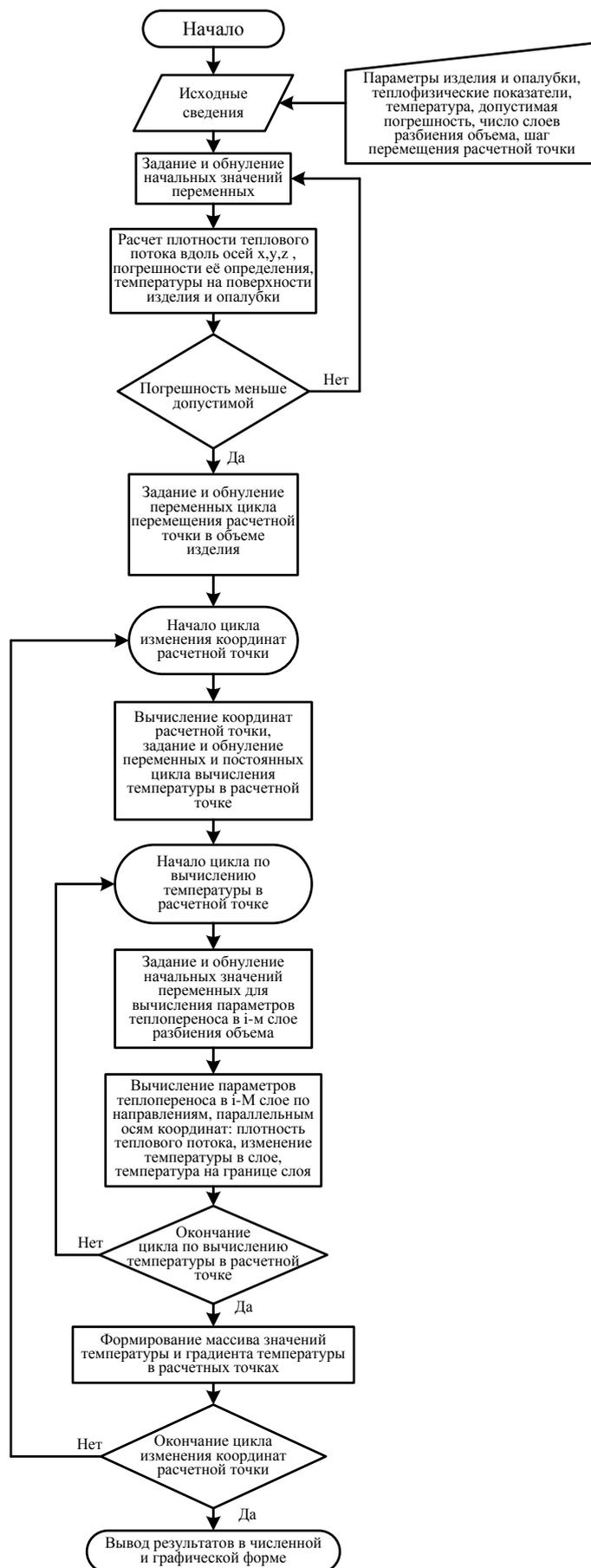


Рис. 3.3. Алгоритм расчета характеристик температурного поля в трехмерном пространстве объема материала изделия в процессе ЭТО

Исходными сведениями для расчета являются:

- параметры изделия и опалубки – размеры железобетонного изделия, толщина ламинированной фанеры или другого материала, использованного для изготовления внутренней поверхности опалубки, толщина теплоизоляционного слоя, толщина обшивки опалубки;
- теплофизические показатели материала изделия и материалов, использованных для изготовления опалубки (коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность);
- температура в центре изделия (в начальной точке системы координат – см. рис. 2.4) и температура окружающего воздуха;
- допустимая погрешность вычисления плотности теплового потока;
- число слоев, на которые мысленно разбивается объем изделия (рис. 2.4) для выполнения вычислений;
- число перемещений (или шаг перемещения) расчетной точки, в которой вычисляется значение температуры и градиента температуры, в направлении, параллельном каждой из осей координат.

Исходные сведения заносятся вручную, а затем выполняются вычисления по программе. В процессе выполнения программы прежде всего производится расчет значений плотности теплового потока $q_{s,l}$, $q_{s,b}$ и $q_{s,h}$ на поверхности изделия вдоль осей координат (рис. 2.4) посредством итерационных вычислений с использованием формул (2.65) и (2.67). Эти вычисления протекают до тех пор, пока погрешность определения искомых величин не будет превышать заданного предельно допустимого значения. Далее работа программы организована в виде двух циклов. Первый из них обеспечивает пошаговое изменение координат X_C , Y_C , Z_C точки C (рис. 2.6) в пределах объема изделия, в которой определяется значение температуры и градиента температуры, в соответствии с заданной величиной шага или числом таких шагов в направлениях, параллельным осям координат.

В конце этого цикла полученные для расчетной точки значения температуры и градиента температуры присваиваются элементам трехмерных массивов температур и градиентов температур. Значения индексов элемента каждого массива определяется числом шагов в направлении каждой из осей координат. По завершении этого цикла указанные выше массивы температуры и градиентов температуры оказываются заполненными и отображаются в численном или графическом виде.

Внутри первого цикла организован второй, который, собственно, и представляет собой реализацию предложенной методики расчета стационарного температурного поля в трехмерном пространстве (разд. 2.2, разд. 2.3 и разд. 2.4). Число шагов этого цикла равно заданному числу слоев, на которые разбивается часть объема изделия, ограниченная координатами расчетной точки. На каждом шаге посредством таких же итерационных вычислений, как и в самом начале программы, определяются значения плотности теплового потока $q_{S,l,i}$, $q_{S,b,i}$, $q_{S,h,i}$ в рассматриваемом слое. Это, в свою очередь, позволяет рассчитать изменение температуры в пределах слоя в направлении, параллельном осям, и в направлении прямой R_C , а также температуру на поверхности этого слоя с использованием формул (2.54) и (2.55). Кроме этого, вычисляется значение градиента температуры в слое с помощью формул вида (2.51). В ходе этого цикла такие вычисления выполняются поочередно для каждого слоя, на которые разбивается рассматриваемый объем, начиная с первого, примыкающего к началу системы координат, и кончая последним, примыкающим к расчетной точке C (рис. 2.6). После завершения этого цикла по известному (заданному) значению температуры $T_{Ц}$ в начале системы координат (в центре изделия), а также заданным параметрам изделия и его опалубки определяется температура $T_{Ц}$ и градиент температуры в расчетной точке, координаты которой определяются выполнением внешнего (первого) цикла (рис. 3.3).

Можно сделать вывод, что с точки зрения используемого в расчетах принципа суперпозиции (разд. 2.2) предложенный алгоритм вычислений (рис. 3.3) означает,

что начальная точка вычислений (например, т. А – рис. 2.3) с известным значением температуры всегда располагается в одном и том же месте: в начале системы координат (рис. 2.4). Конечная (расчетная) точка (например, т. В – рис. 2.3), в которой необходимо определять значения температуры и градиента температуры, перемещается в пространстве (в объеме изделия) с заданным шагом и заданной траектории.

Анализ возможных вариантов программной реализации рассмотренного алгоритма расчета (рис. 3.3) позволил сделать вывод, что среда MATLAB является наилучшим средством для такой реализации. Действительно, программирование расчетов в этой среде отличается простотой и известно широкому кругу пользователей. Кроме этого, MATLAB имеет широкий набор инструментов графического отображения результатов вычислений, что очень удобно для наглядного представления температурных полей и полей градиентов температуры, а также практического использования полученных результатов. В Приложении 1 приведена программа расчетов по этому алгоритму в виде М-файла среды MATLAB. Обращает на себя небольшие размеры и простота этой программы, хотя она обеспечивает решение достаточно сложной задачи. Например, при использовании для расчета двумерных температурных полей в строительных конструкциях метода конечных элементов описание программно-алгоритмической реализации без описания методики расчета и представления самой программы вычислений занимает более 20 страниц машинописного текста [125]. При этом для того, чтобы самостоятельно осуществить расчеты по этим описаниям требуются специальные знания и подготовка пользователя.

3.3. Исследование характеристик температурного поля в трехмерном пространстве объема обрабатываемого железобетонного изделия в процессе ЭТО

Разработанная методика расчета стационарного температурного поля в трехмерном пространстве (разд. 2.2, 2.3 и 2.4) и ее программно-алгоритмическая реализация (разд. 3.2) предоставляют широкие возможности для всестороннего исследования температурных полей в объеме железобетонных изделий в процессе их ЭТО и получения результатов, необходимых для создания технологического оборудования и успешного применения такого процесса на практике. Как показано в [100] и отмечено в гл. 1, при тех значениях подъема температуры изделия в ходе электроразогрева, которые рекомендованы для ЭТО и имеют место на практике (как правило, не более $10\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$), температурное поле в объеме изделия можно считать стационарным. Это дает основание применять для исследования таких температурных полей и получения практических рекомендаций предложенную расчетную методику (разд. 2.2, 2.3 и 2.4).

Одно из важнейших условий успешного применения ЭТО железобетонных изделий – это обязательное наличие теплоизоляции на поверхности обрабатываемого изделия [100,126]. Этот вывод был получен на основании, в основном, результатов экспериментальных исследований [100,126]. Поэтому представляется весьма интересным выяснить влияние наличия и параметров теплоизоляции на характеристики температурного поля, используя предложенную методику (разд. 2.2, 2.3 и 2.4). Для этого был выполнен расчет распределения температуры (температурного поля) в горизонтальном сечении, т.е. в сечении плоскостью XOY – рис. 2.4, объекта в виде параллелепипеда с размерами $1180 \times 400 \times 580$ (длина/ширина/высота), который соответствует фундаментному блоку типа ФБС 12.4.6. Расчеты проведены для двух вариантов конструктивного выполнения опалубки: в первом она имеет только стенки из ламинированной фанеры толщиной 20 мм, во втором – на поверхности фанеры располагается теплоизоляция в виде слоя пенопласта толщиной $H_{II} = 50$ мм,

поверх которой уложена обшивка из обычной фанеры толщиной 4 мм. При выполнении расчетов предполагалось, что температура в центре изделия имеет величину $T_{Ц} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (рекомендуемое значение согласно [100], температура окружающего воздуха $T_0 = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Результаты расчетов представлены на рис. 3.4 в виде поверхности значений температуры в зависимости от координат горизонтальных осей.

Анализ полученных результатов (рис. 3.4) позволяет сделать вывод о значительном влиянии теплоизоляции в составе опалубки на однородность температурного поля в объеме изделия. В наиболее простом виде оценку однородности температурного поля можно выполнить посредством сравнения максимального значения температуры (в центре каждой плоскости – рис. 3.4) и наименьшего значения (в углах сечения) [100,118]. Например, при отсутствии теплоизоляции (рис. 3.4,а и б) различие между этими значениями составляет 24 % и 22,6 % от наибольшего значения (в центре каждой плоскости). При наличии теплоизоляции (рис. 3.4,в и г) это различие составляет 7,7 % и 7,6 %, соответственно, т.е. применение теплоизоляции позволяет уменьшить перепад температуры в пределах каждого сечения практически в 3 раза. Полученные результаты (рис. 3.4) позволяют также оценить максимальную разность температур (максимальный перепад температуры), наблюдаемую в температурном поле объекта, как разницу между наибольшим значением температуры (в центре объекта: $T_{Ц} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и наименьшим значением этого параметра T_{\min} , которое возникает в вершинах параллелепипеда (рис. 2.4) и определяется по зависимостям, полученным для верхней поверхности такого объекта (рис. 3.4, б и г), как температура в углах этой поверхности:

$$\Delta T_{\max} = T_{Ц} - T_{\min} \quad (3.1)$$

Знание этого показателя свидетельствует об отличии температурных условий твердения бетона в различных точках объема изделия, поскольку скорость гидратации цемента и, соответственно, скорость набора бетоном механической прочности в сильной степени зависит от температуры его твердения [1,4-7,100].

Для анализа и сравнения различных вариантов применения ЭТО удобно пользоваться относительным значением максимальной разности температур:

$$\Delta T_{\max}^* = \frac{(T_{Ц} - T_{\min})}{T_{Ц}} 100\% . \quad (3.2)$$

Вполне очевидно, что на практике целесообразно стремиться к достижению минимальных значений этих показателей (ΔT_{\max} , ΔT_{\max}^*) для того чтобы обеспечить одинаковые условия твердения и механическую прочность бетона по всему объему изделия.

Полученные результаты (рис. 3.4) также позволяют убедиться в удобстве применения среды MATLAB для исследования температурных полей объеме изделий с помощью предложенной методики. Например, перемещая курсор по поверхности значений температуры (см. рис. 3.4) можно быстро определять точное значение температуры в требуемых точках, что позволило получить оценки однородности температурного поля, приведенные выше. На рис. 3.4 все зависимости в целях наглядного сравнения полученных результатов при различных условиях выполнены с одинаковым масштабом по вертикали. Однако в этом случае зависимости при более однородном температурном поле (рис. 3.4, в и г) имеют вид не очень удобный для проведения исследований. Это препятствие без труда преодолевается необходимым изменением масштаба по вертикали (рис. 3.5, а), а, используя опцию вращения, можно расположить рисунок в необходимое положение, например для визуального наблюдения и количественного определения расположения изотерм (рис. 3.5, б) по линиям одинакового цвета.

Сравнение максимальных значений перепада температуры в объеме материала, полученных на основании рис. 3.4 при отсутствии теплоизоляции, с величиной аналогичного показателя при осуществлении традиционной ТВО [107,108] свидетельствует о практически одинаковой величине этого параметра при ТВО и ЭТО изделий в опалубке без теплоизоляции.

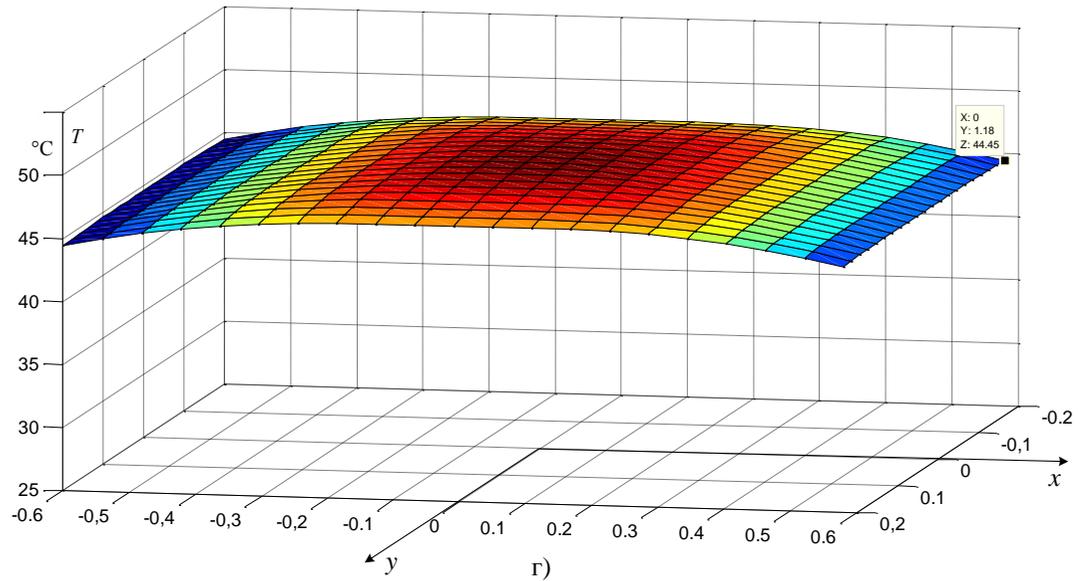
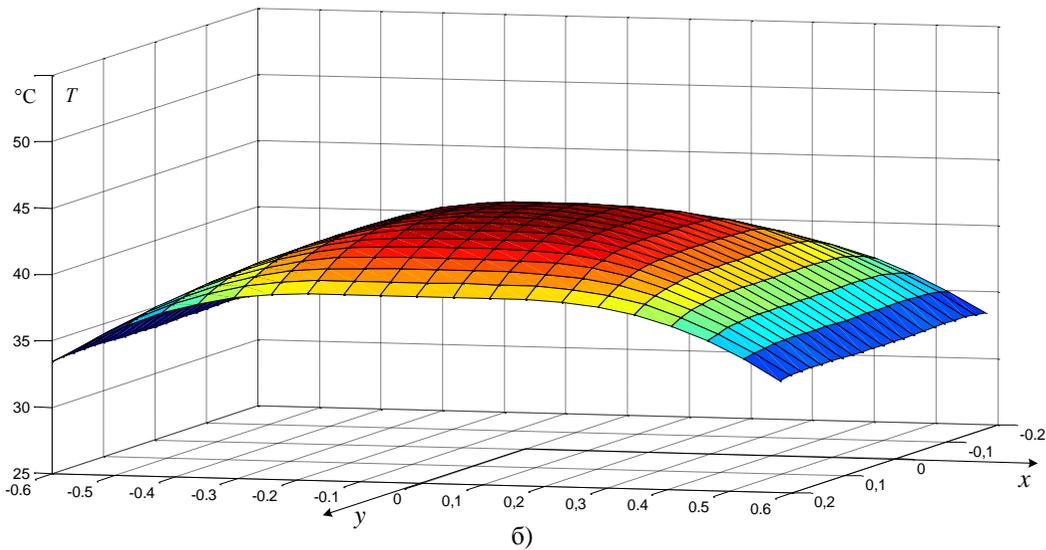
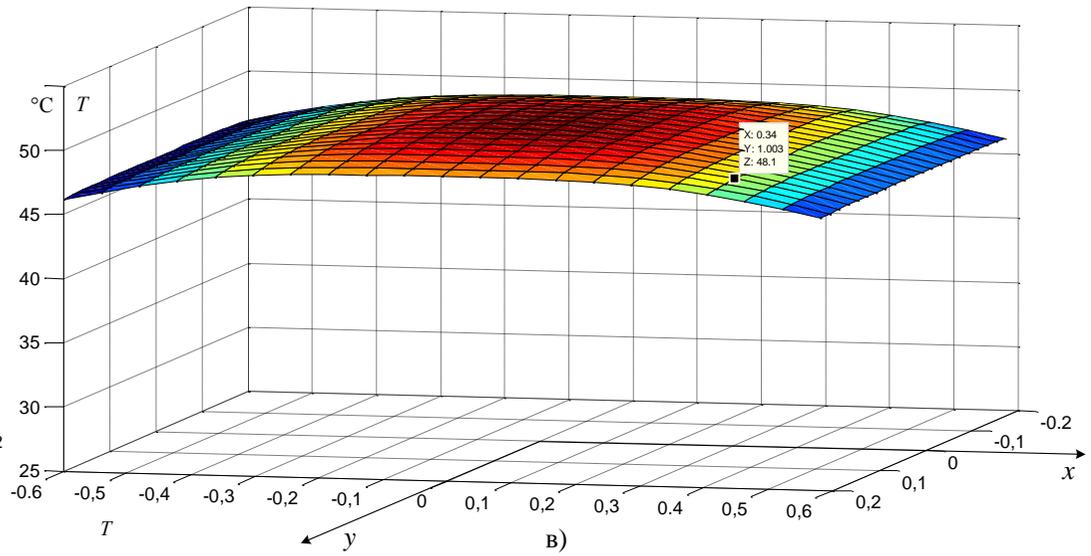
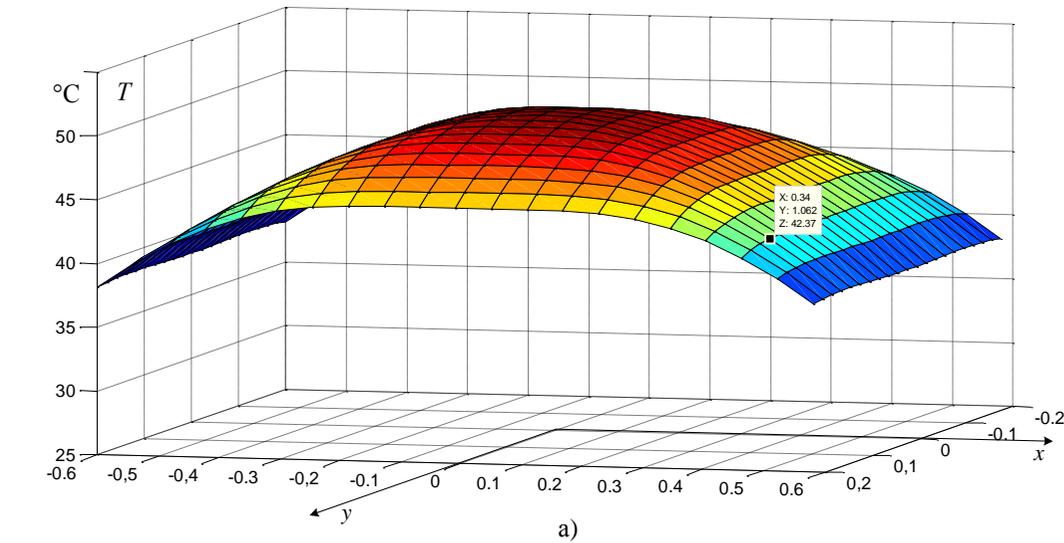


Рис. 3.4 Температурное поле, т.е. зависимость температуры от координат, x и y в горизонтальном сечении (а,в) на уровне плоскости XOY ($z=0$ – рис. 2.4) и на верхней ($z=h/2$ – рис. 2.4) горизонтальной поверхности (б,г) объекта при отсутствии (а,б) и при наличии (в,г) на поверхности опалубки теплоизоляции (пенопласт толщиной 50 мм); координаты вдоль осей x и y выражены в метрах

Таким образом, применение ЭТО в таком виде не приносит ощутимого результата по достижению более однородного температурного поля, чем при ТВО, даже при наличии однородного тепловыделения в объеме обрабатываемого изделия. Лишь применение теплоизоляции позволяет существенно повысить однородность температурного поля (рис. 3.4) и выровнять температурные условия твердения бетона, что обеспечивает полную уверенность в требуемом качестве получаемых железобетонных изделий.

Вместе с тем, существует задача по оценке влияния толщины теплоизоляционного слоя H_{II} на характер температурного поля и выбора рационального значения этого параметра. На рис. 3.6 представлены результаты расчета аналогичные тем, что показаны на рис. 3.4, для двух значений толщины теплоизоляционного слоя – 10 и 100 мм.

Согласно сведениям, приведенным на рис. 3.6, величина максимального перепада температуры в объеме изделия составляет $\Delta T_{\max}^* = 23\%$ и $6,8\%$ при толщине теплоизоляции $H_{II} = 10$ и 100 мм, соответственно. Таким образом, десятикратное увеличение толщины теплоизоляционного слоя, хотя и повышает однородность температурного поля, но не в такой же пропорции (в 3,4 раза). С другой стороны, согласно рис. 3.4 и рис. 3.6 наличие теплоизоляции небольшой толщины (10 мм) позволяет уменьшить этот показатель приблизительно 1,5 раза, т.е. является достаточно эффективной мерой повышения однородности температурного поля.

Другим важным фактором, который может оказывать влияние на характеристики температурного поля, являются размеры изделия. На рис. 3.7 представлено распределение температуры в тех же сечениях и такой же теплоизоляции, как на рис. 3.4 (толщина слоя теплоизоляции – 50 мм), при прежних значениях ширины и высоты изделия и двух значений длины: 880 и 2380 мм, что соответствует размерам железобетонных изделий в виде фундаментных блоком типа ФБС 9.4.6 и ФБС 24.4.6 соответственно.

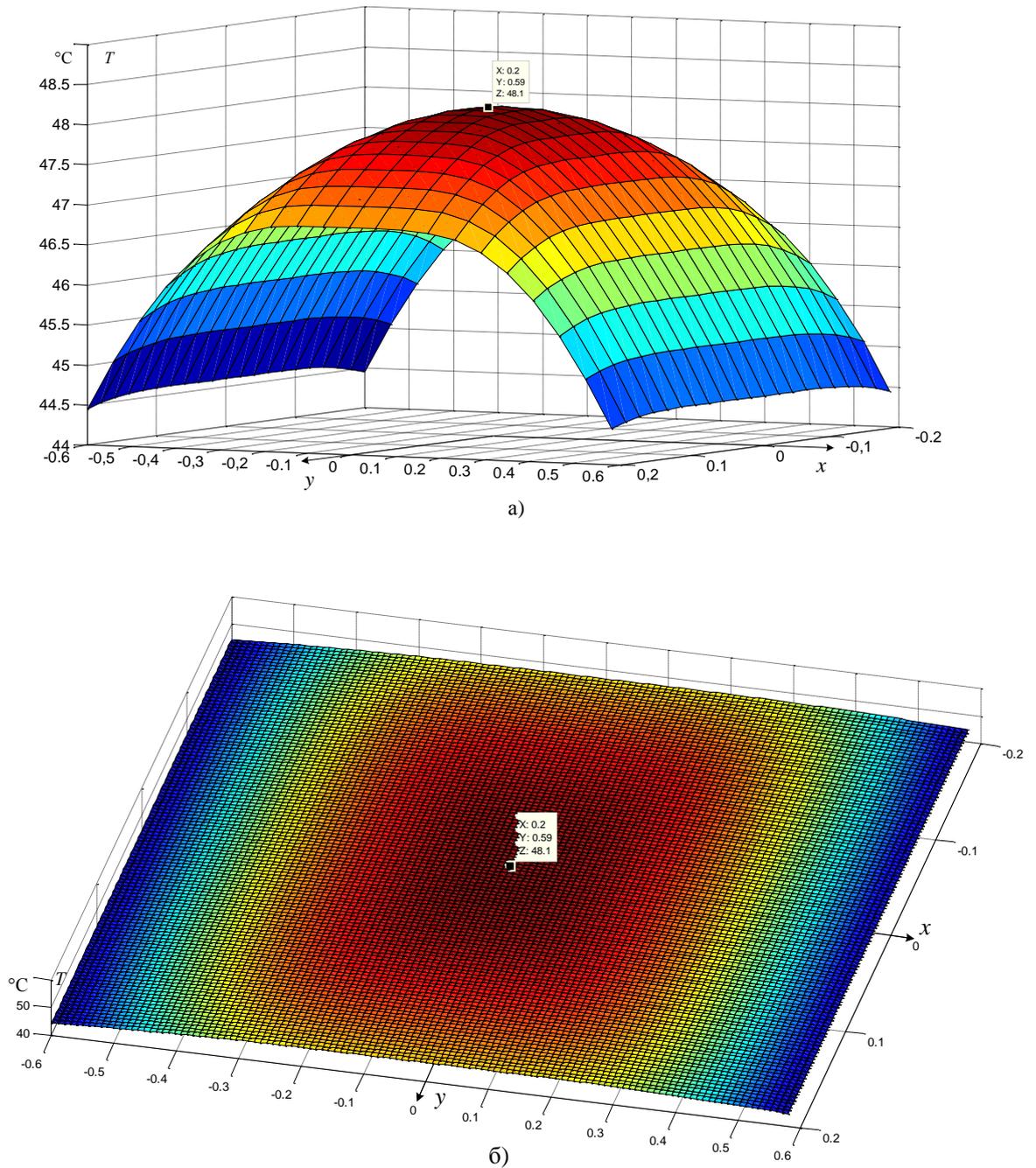


Рис. 3.5. Зависимость рис. 3.4,г с увеличенным масштабом по вертикали (а) и при расположении для удобного (вид сверху) наблюдения изотерм (б) с одновременным увеличением числа расчетных точек в три раза

Анализ этих результатов совместно с рис. 3.4 (для блока ФБС 12.4.6) позволяет сделать вывод о заметном влиянии длины изделия в этом случае на характеристики температурного поля. Например, для значений длины изделия 880, 1180 и 2380 мм максимальная разность температуры (3.2) составляет 9,6 %,

11 % и 16,7%, т.е. с увеличением размеров изделия наблюдается увеличение этого показателя.

Хотя рис. 3.4, 3.6 и 3.7 наглядно демонстрирует влияние различных факторов на характер температурного поля в объеме изделия в процессе ЭТО, этих сведений недостаточно для обоснованного выбора параметров теплоизоляции. Поэтому с помощью предложенной расчетной методики (разд. 2.2-2.4), используя результаты вычислений вида рис. 3.4, 3.6 и 3.7, были получены зависимости максимальной разности температур от толщины теплоизоляционного слоя (пенопласта) для тех же условий и объектов, как в случае рис. 3.4, 3.6 и 3.7, а также трех значений температуры в центре изделия $T_{Ц} = 40, 50$ и 60 °С, которые представлены на рис. 3.8.

Полученные зависимости имеют нелинейный характер и свидетельствуют о том, что, хотя увеличение толщины теплоизоляционного слоя позволяет существенно повышать однородность температурного поля, но добиться идеальной однородности (т.е. $\Delta T_{\max}^* = 0$) практически невозможно. Такой вывод согласуется с аналогичным результатом, полученным в разд. 3.1. Следует отметить достаточно слабое влияние температуры $T_{Ц}$ на величину ΔT_{\max}^* , а также более существенное воздействие на величину этого параметра размеров изделия. Вместе с тем, можно рекомендовать такие значения толщины теплоизоляции, дальнейшее увеличение которой не приводит к ощутимому эффекту.

В качестве рационального решения можно предложить применение теплоизоляционного слоя толщиной 4÷6 см, а в качестве предельного значения следует считать теплоизоляцию толщиной 8÷10 см. Однако окончательное решение по выбору размеров теплоизоляционного слоя можно сделать на основании исследования градиентов температуры и моделирования процесса твердения бетона с учетом максимальной разности температур в объеме обрабатываемого изделия, которые представлены ниже (разд. 3.4 и 3.6).

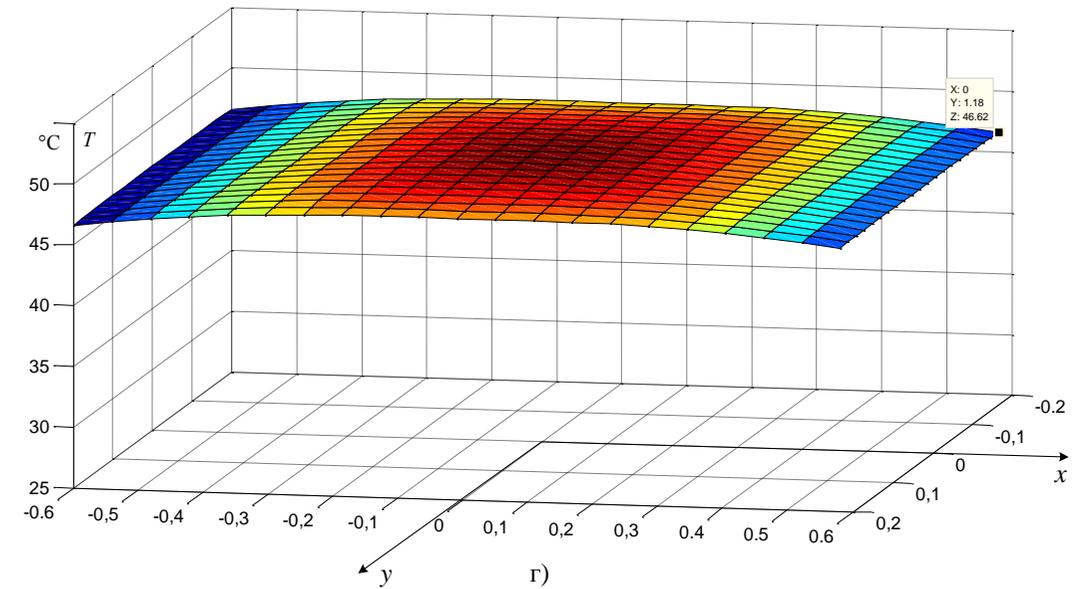
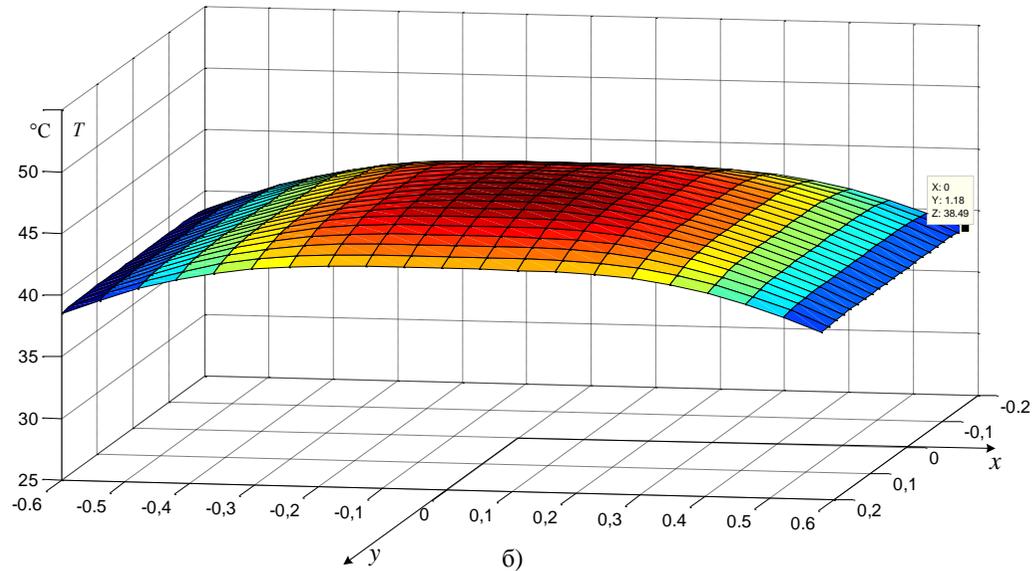
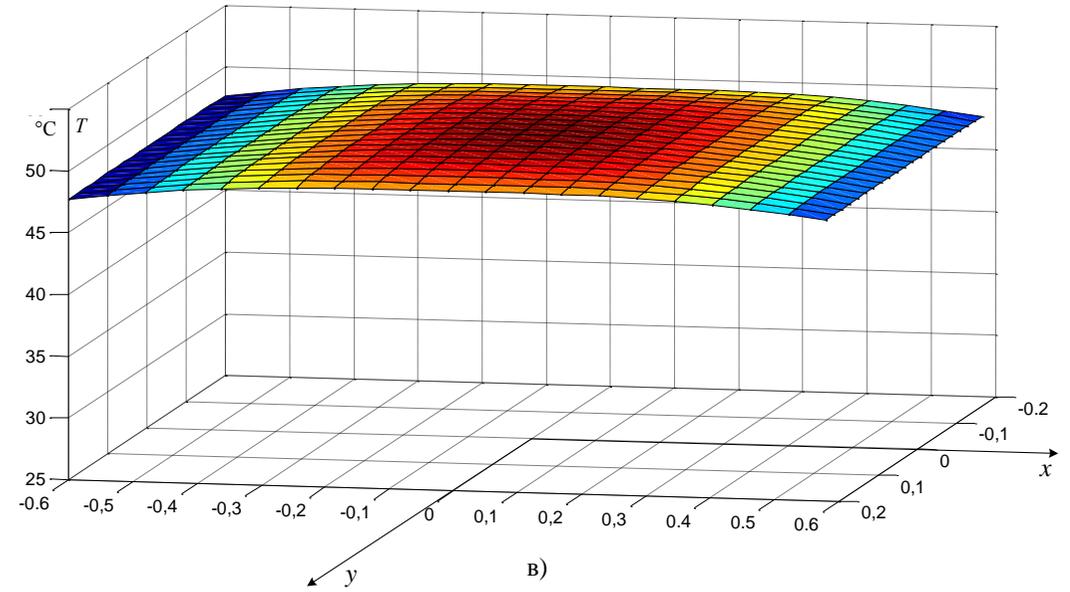
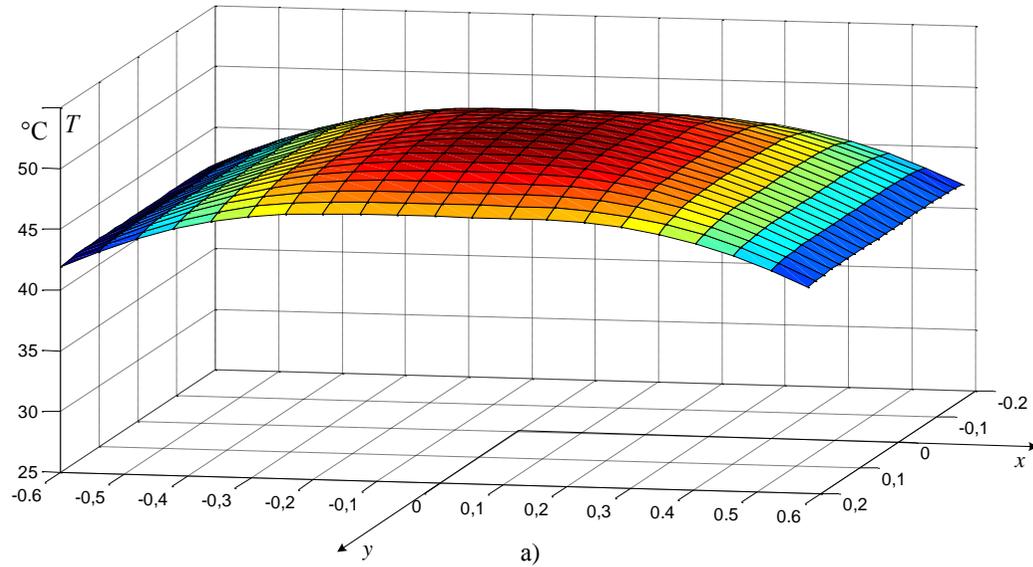


Рис. 3.6. Температурное поле в горизонтальном сечении (а,в) на уровне плоскости XOY ($z=0$ – рис. 2.4) и на верхней ($z=h/2$ – рис. 2.4) горизонтальной поверхности (б,г) объекта при наличии на поверхности опалубки теплоизоляции (пенопласт) толщиной 10 мм (а,б) и 100 мм (в,г); значения вдоль осей x и y выражены в метрах

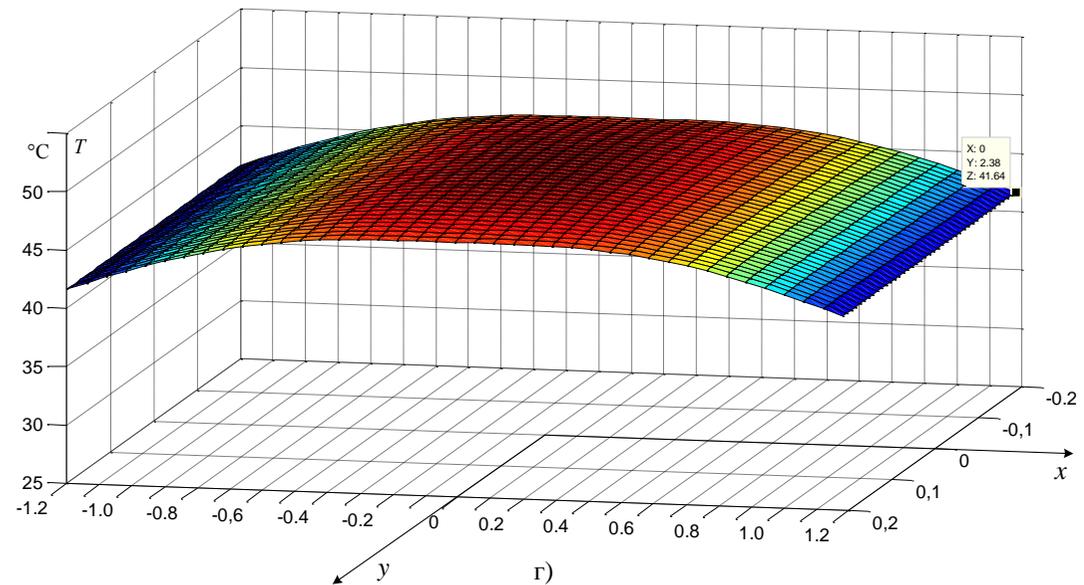
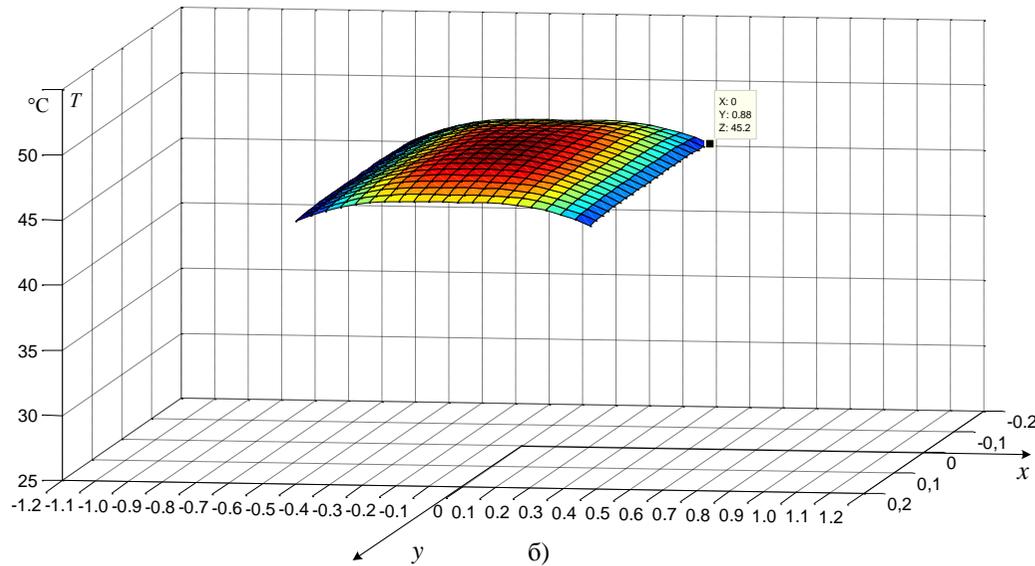
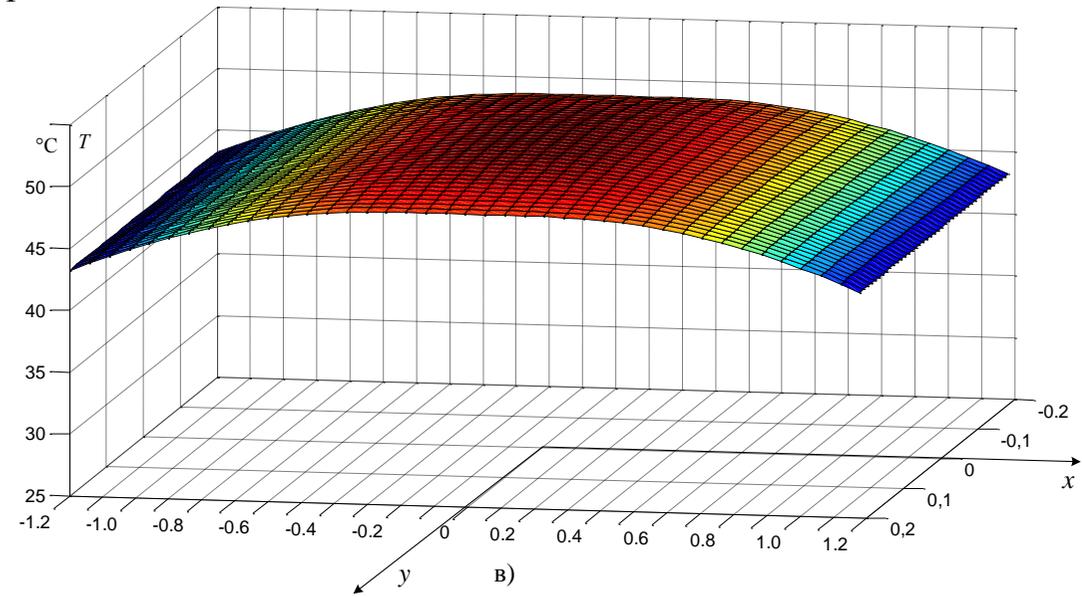
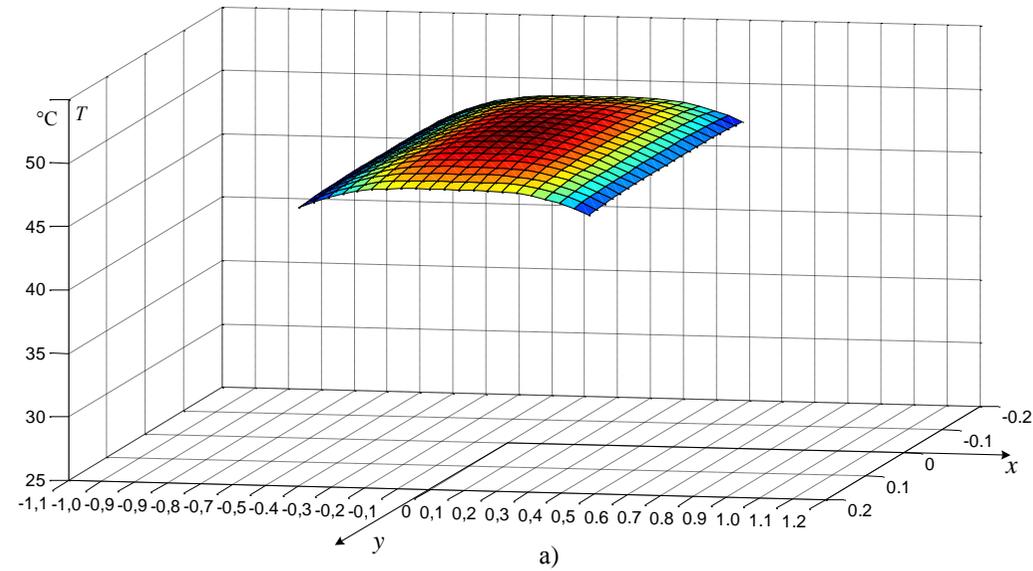


Рис. 3.7. Температурное поле в горизонтальном сечении (а,в) на уровне плоскости XOY ($z=0$ – рис. 2.4) и на верхней ($z=h/2$ – рис. 2.4) горизонтальной поверхности (б,г) объекта при наличии на поверхности опалубки теплоизоляции (пенопласт) толщиной 50 мм длиной 0,88 м (а,б) и 2,38 м (в,г); значения вдоль осей x и y выражены в метрах

Поскольку размеры изделия, как свидетельствует рис. 3.7 и 3.8, оказывают заметное влияние на неоднородность температурного поля, представляет интерес исследование характеристик температурного поля изделий, которые имеют сравнительно небольшие размеры в поперечном сечении и большую длину.

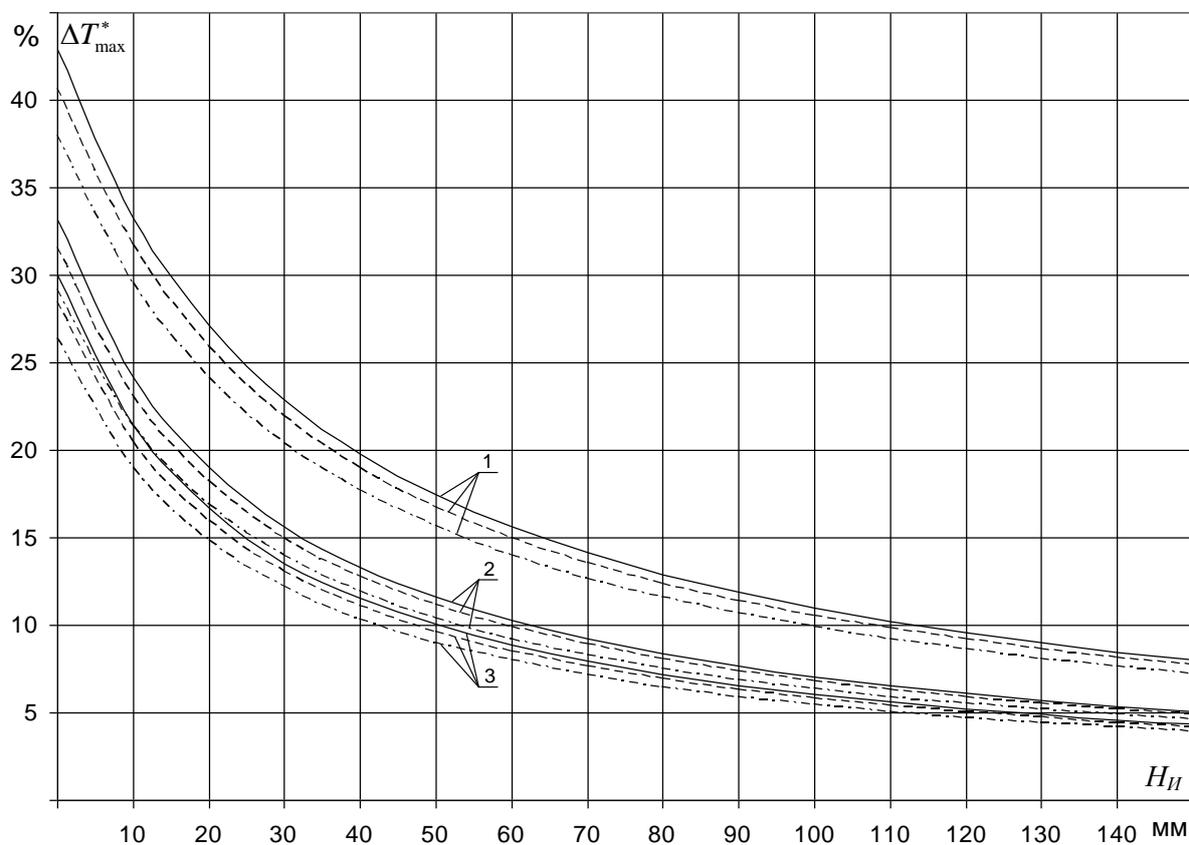


Рис. 3.8 Зависимость максимальной разности температур в объеме изделия (фундаментный блок) от толщины теплоизоляционного слоя опалубки: 1 – блок типа ФБС 24.4.6; 2 – блок типа ФБС 12.4.6; 3 – блок ФБС 9.4.6; сплошные линии – $T_{ц} = 60^{\circ}\text{C}$; пунктирные линии – $T_{ц} = 50^{\circ}\text{C}$; штрихпунктирные линии – $T_{ц} = 40^{\circ}\text{C}$

К числу таких изделий, например, относятся перемычки оконных и дверных проемов, забивные сваи, железобетонные столбы, шпалы и др. На рис. 3.9 представлено расчетное распределение температуры в сечении плоскостью XOY и на верхней поверхности изделия с размерами, соответствующими перемычке типа 9ПБ21-8-п (длина – 2070 мм, ширина – 120 мм, высота – 190 мм) при температуре в центре изделия $T_{ц} = 50^{\circ}\text{C}$ и температуре окружающей среды (воздуха) $T_o = 10^{\circ}\text{C}$ для случая отсутствия и наличия теплоизоляции (пенопласт 5 см) на поверхности опалубки.

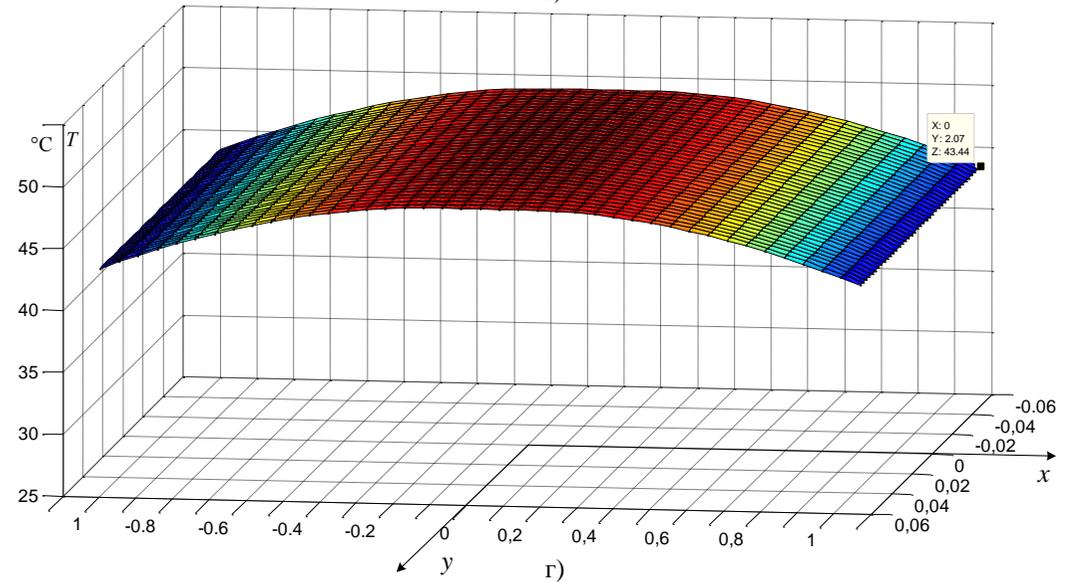
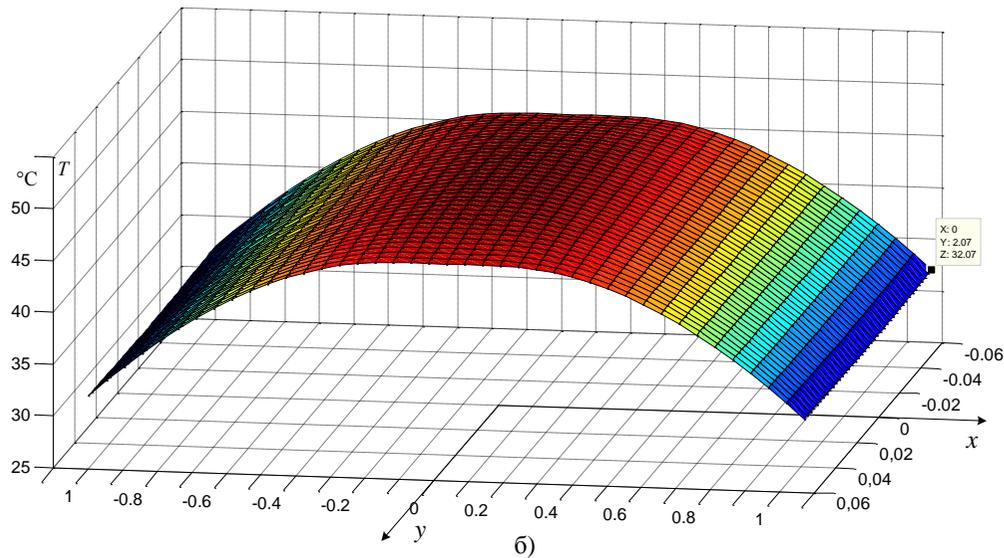
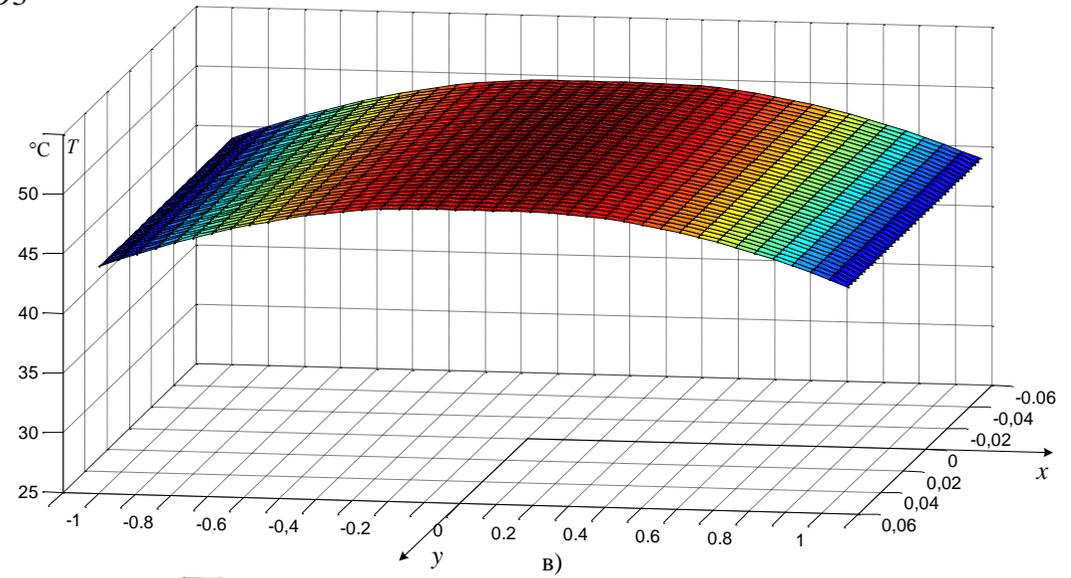
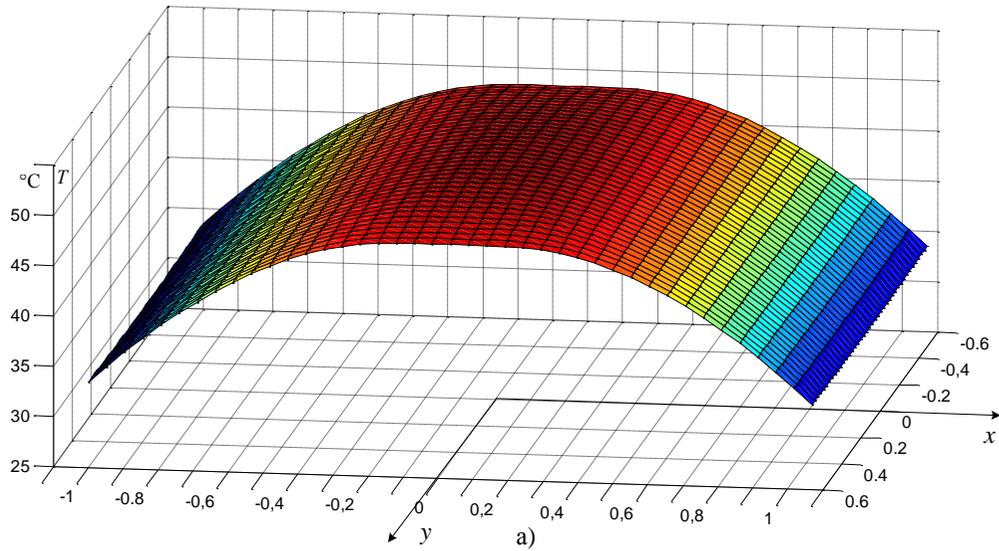


Рис. 3.9. Температурное поле, т.е. зависимость температуры от координат, x и y в горизонтальном сечении (а,в) на уровне плоскости XOY ($z=0$ – рис. 2.4) и на верхней ($z=h/2$ – рис. 2.4) горизонтальной поверхности объекта (перемычка типа 9ПБ21-8-п) при отсутствии (а,б) и при наличии (в,г) на поверхности опалубки теплоизоляции (пенопласт толщиной 50 мм); значения вдоль осей x и y выражены в метрах

Исследование этих зависимостей (рис. 3.9) с помощью разработанного программного обеспечения показывает, что максимальный перепад температуры в поперечном направлении составляет 3,3 % и 0,8 % (от наибольшего значения температуры) для случая отсутствия и наличия теплоизоляции. Это значительно меньше максимального перепада температуры вдоль изделия, которое составило 33,5 % и 12 % соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для подобных изделий исследование температурных полей в их объеме в ходе ЭТО необходимо выполнять, прежде всего, в направлении наибольшего размера (длины) с использованием сравнительно простых решений, полученных для случая одномерного теплопереноса, как показано в разд. 3.1.

В целях проверки такого вывода были выполнены расчеты температурного поля для объекта в виде забивной сваи квадратного сечения 300x300 мм длиной 3000 мм, результаты которых представлены на рис. 3.10.

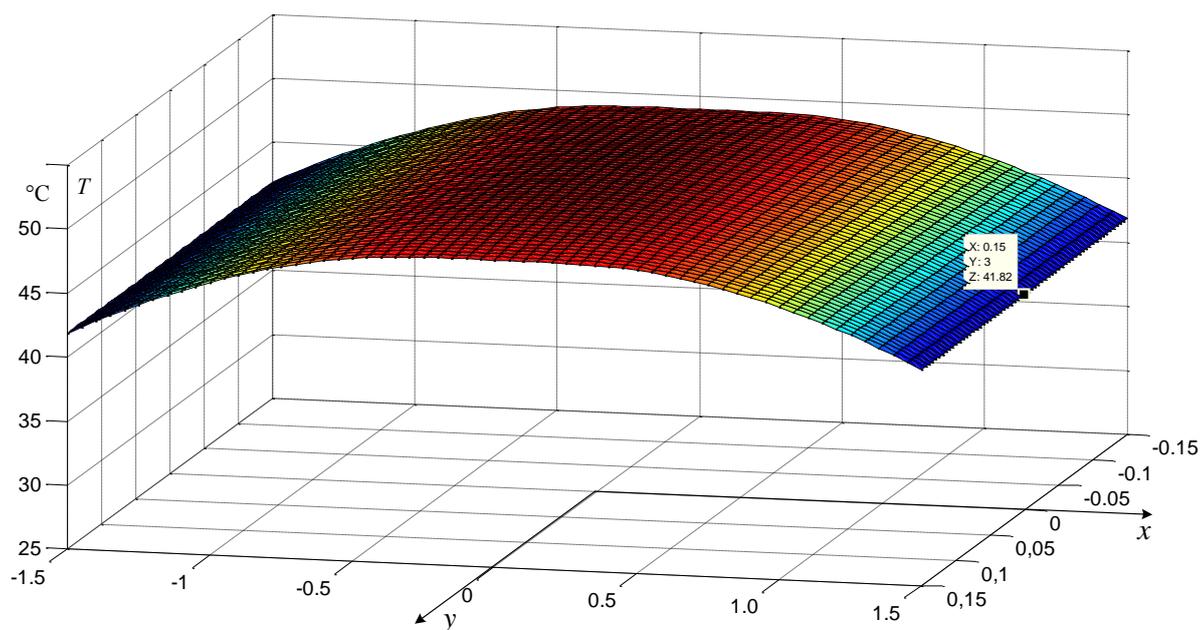


Рис. 3.10. Температурное поле, т.е. зависимость температуры от координат, x и y в горизонтальном сечении (а,в) на уровне плоскости XOY ($z=0$ – рис. 2.4) для забивной сваи; значения вдоль осей x и y выражены в метрах

Одной из основных задач разработки процессов ЭТО, как отмечено выше, является достижение по возможности наиболее однородного температурного поля в объеме изделия. Поэтому, представленные в этом разделе результаты теоретических исследований, дают основание сделать заключение, что управление этим температурным полем в целях повышения его однородности можно достичь не только управлением электрическим полем (разд. 3.1), но и применением теплоизоляционного слоя на поверхности опалубки переменной толщины.

Для решения такой задачи может быть использована предложенная расчетная методика (разд. 2.2 – 2.4) и ее программно-аналитическая реализация (разд. 3.2) с учетом необходимых для этого усовершенствований и модернизации. Решение этой задачи является отдельной темой научных разработок в дальнейшем.

3.4. Исследование градиентов температурного поля в трехмерном пространстве объема обрабатываемого железобетонного изделия в процессе ЭТО

Как было показано в [100,112], при исследовании температурных полей в объеме изделия, подвергающегося тепловой обработке, большое практическое значение имеет знание градиентов температуры. Это объясняется тем, что температурные градиенты являются причиной возникновения внутренних механических напряжений в материале изделия, которые могут привести к его повреждению и утрате нормативной механической прочности. Причем наиболее опасной является стадия разогрева изделия (рис. 1.3), когда такие внутренние напряжения воздействуют на еще недостаточно окрепший материал (бетон). Даже при сравнительно невысоких значениях температуры могут возникать опасные температурные градиенты.

Преимуществом предложенной методики расчета температурных полей (разд. 2.2 – 2.4) состоит в том, что одновременно с вычислением абсолютного

значения температуры в заданной точке объема материала определяется как полное значение градиента температуры в этой точке, так и его составляющие вдоль осей координат (2.25). Поэтому такая методика является удобным инструментом исследования градиентов температуры при разработке безопасных режимов ЭТО железобетонных изделий.

Результаты расчета градиентов температуры удобно представлять в таком же виде, как результаты вычислений самой температуры, т.е. в виде поверхностей значений параметра в функции от координат (разд. 3.3) с той разницей, что вместо температуры используются значения ее градиента. На рис. 3.11 представлены результаты расчета температурных градиентов для условий, при которых были получены зависимости температуры, представленные на рис. 3.4 ($T_{Ц} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_o = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, объект: 1180x400x580 – ФБС 12.4.6), в одинаковом масштабе.

Из рис. 3.11,а,в видно, что для случая определения градиентов в горизонтальном сечении на уровне плоскости XOY ($z=0$ – рис. 2.4) значение этого параметра в точке начала системы координат, т.е. в центре объекта, равно нулю. Это соответствует краевым условиям (2.4) при решении уравнений теплопереноса (2.29) в предложенной методике расчета температурного поля в 3-х мерном пространстве (разд. 2.3). В этом сечении наблюдается также большая неоднородность распределения градиентов температуры в сравнении с картиной их изменения на поверхности объекта (рис. 3.11,б и г).

На характер распределения градиентов температуры и их абсолютную величину значительное влияние оказывает наличие теплоизоляции на поверхности опалубки.

При отсутствии теплоизоляции (рис. 3.11,а,б) характер распределения градиентов температуры качественно заметно различается. Например, в сечении на уровне плоскости XOY ($z=0$ – рис. 2.4) максимальное значение градиентов температуры наблюдается в углах сечения (рис. 3.11,а) и их величина остается практически неизменной вдоль наибольшей стороны сечения (параллельной оси x).

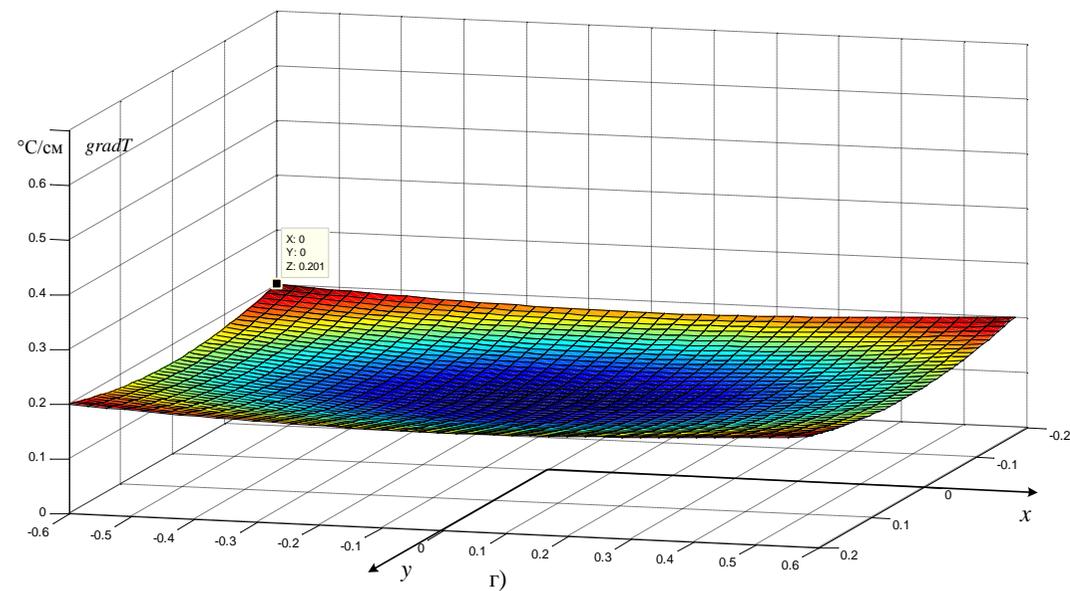
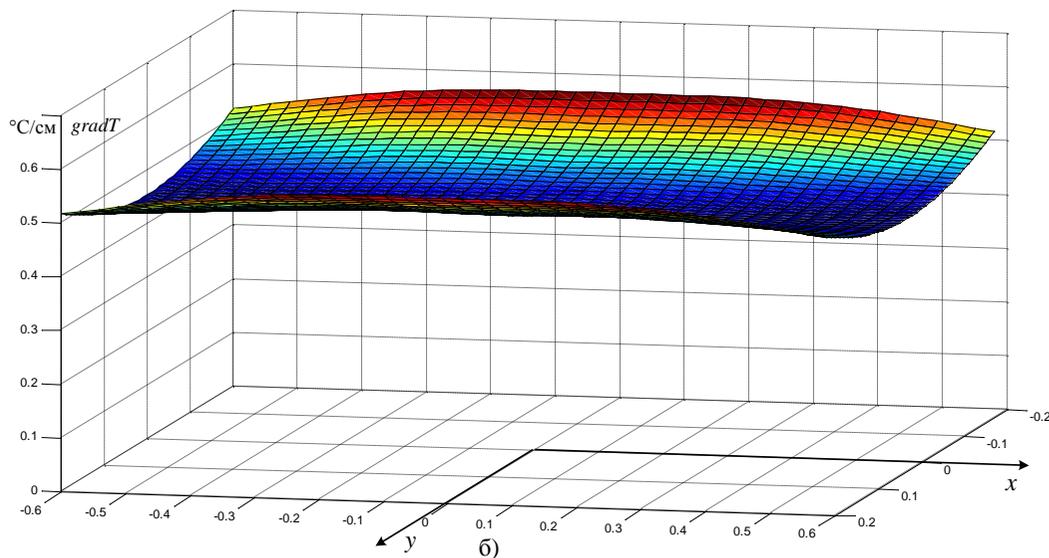
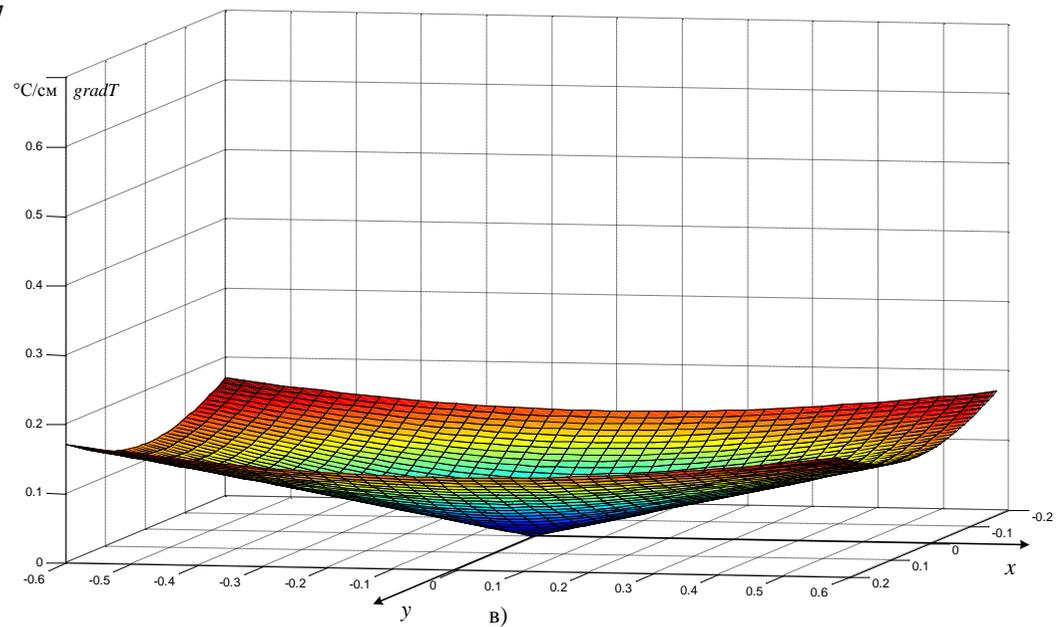
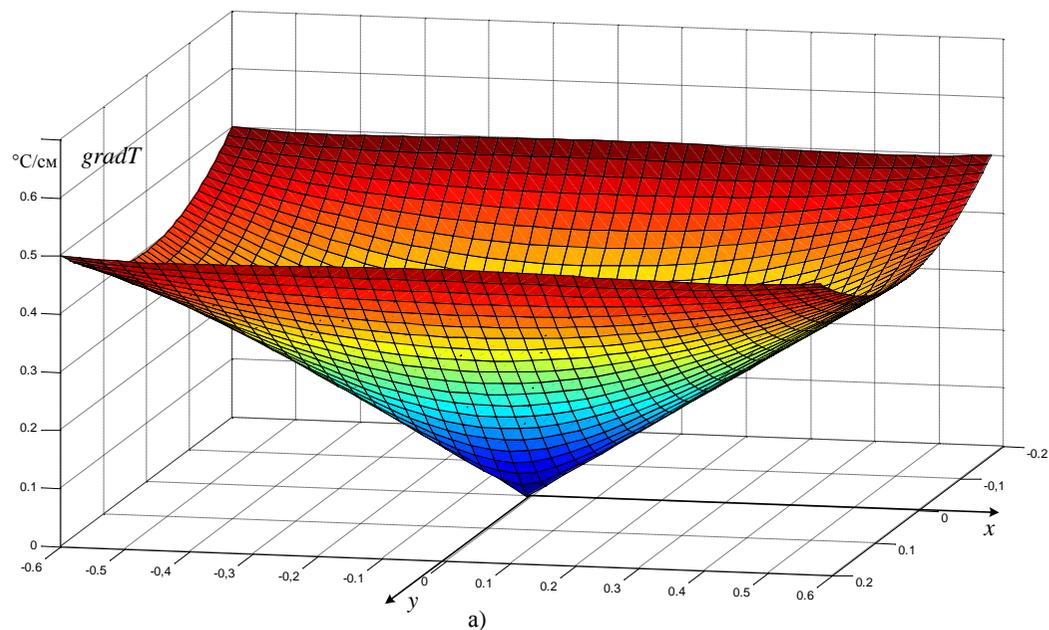


Рис. 3.11. Зависимость градиентов температуры от координат, x и y в горизонтальном сечении (а,в) на уровне плоскости XOY ($z=0$ – рис. 2.4) и на верхней ($z=h/2$ – рис. 2.4) горизонтальной поверхности (б,г) объекта при отсутствии (а,б) и при наличии (в,г) на поверхности опалубки теплоизоляции (пенопласт толщиной 50 мм); объект: 1180x400x580 – ФБС 12.4.6; значения вдоль осей x и y выражены в метрах

На поверхности объекта (рис. 3.11,б) градиенты температуры имеют максимальное значение посередине наибольшей стороны, заметно снижаясь к углам поверхности. При наличии теплоизоляции (рис. 3.11,в,г) наибольшая величина градиентов температуры имеет место в углах сечения (поверхности).

При изучении градиентов температуры, прежде всего, представляет интерес наивысшее значение этого параметра и место его возникновения в объеме материала. Анализ рис. 3.11 позволяет сделать вывод, что наибольшие значения градиента температуры в любом случае наблюдаются на верхней поверхности объекта, но в разных точках, как отмечено выше.

При этом наличие теплоизоляции позволяет весьма существенно уменьшить максимальное значение градиентов температуры: в 2,8 раза. Это приблизительно соответствует, отмеченному выше, уменьшению максимального перепада температуры в объеме материала (рис. 3.4).

Для уточнения влияния толщины теплоизоляционного слоя на величину градиентов были получены картины распределения градиентов температуры для тех же условий, которым соответствуют зависимости рис. 3.6, т.е. для случаев, когда толщина теплоизоляционного слоя составляет 10 и 100 мм. Результаты представлены на рис. 3.12 и совместно с рис. 3.11 свидетельствуют о том, что как при отсутствии теплоизоляции, так и при ее наличии максимальные значения градиента температуры наблюдаются на поверхности объекта.

Характерно, что при появлении и увеличении толщины теплоизоляционного слоя на поверхности опалубки точки с максимальным значением градиента температуры продолжают находиться на тех же элементах объекта: на ребрах, имеющих наибольшую длину (рис. 3.12,б).

Полученные результаты (рис. 3.11 и 3.12) свидетельствуют о значительном влиянии наличия и размеров (толщины) теплоизоляции на величину максимального значения градиента температуры. Например, при увеличении толщины теплоизоляции с 10 мм до 100 мм происходит уменьшение этого параметра практически в два раза (рис. 3.12,б и г).

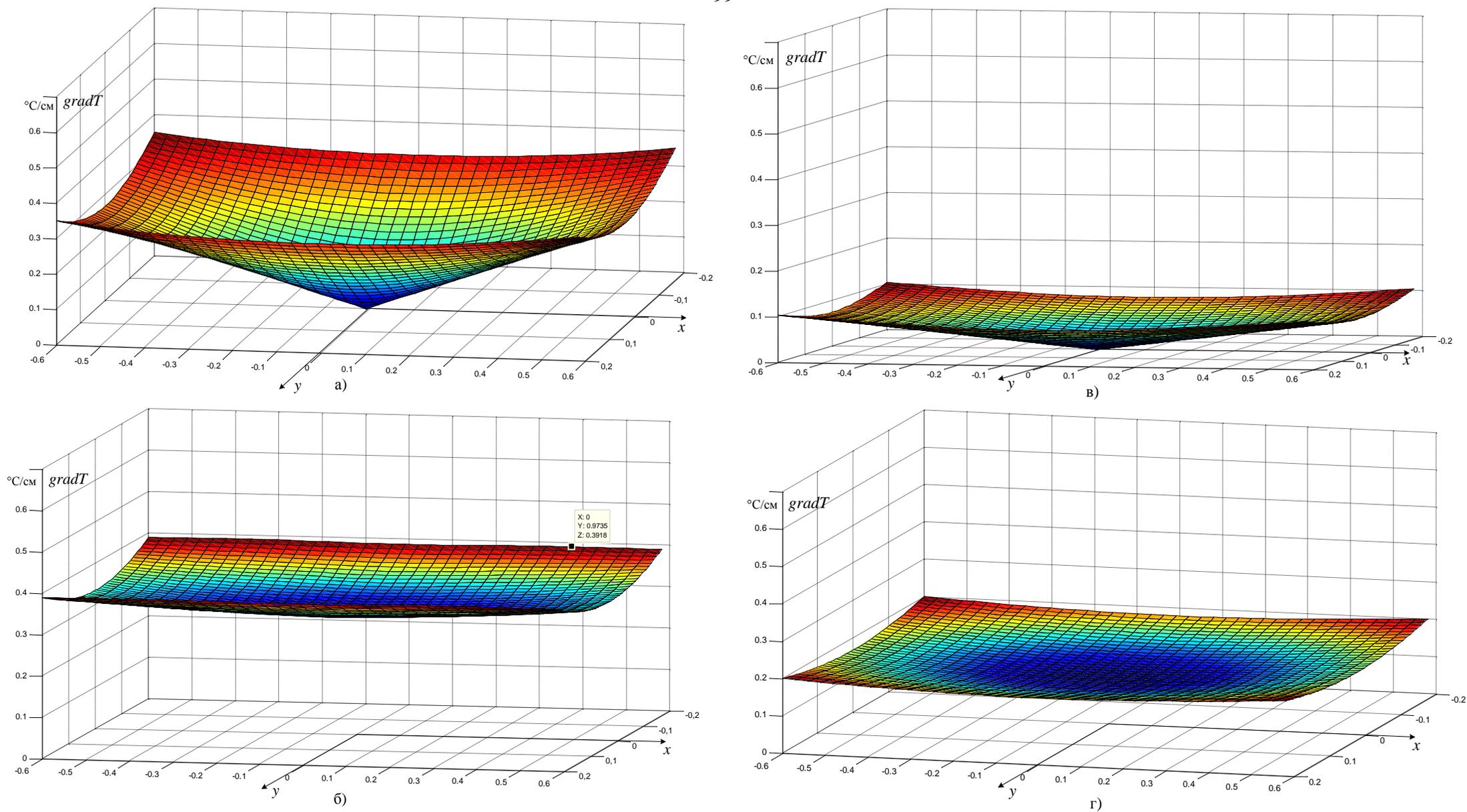


Рис. 3.12. Зависимость градиентов температуры от координат, x и y в горизонтальном сечении (а,в) на уровне плоскости XOY ($z=0$ – рис. 2.4) и на верхней ($z=h/2$ – рис. 2.4) горизонтальной поверхности (б,г) объекта при наличии на поверхности опалубки теплоизоляции (пенопласт) толщиной 10 мм (а,б) и 100 мм (в,г); объект: 1180x400x580 – ФБС 12.4.6; значения вдоль осей x и y выражены в метрах

Тем не менее, влияние толщины теплоизоляционного слоя на величину максимального градиента выражено слабее, чем на величину ΔT_{\max}^* (рис. 3.6), где снижение составило около 3,4 раза.

По аналогии с рис. 3.7 с помощью зависимостей вида рис. 3.11 и 3.12 были рассчитаны и построены зависимости величины максимального градиента температуры от толщины теплоизоляционного слоя при различных размерах объекта и температуры в его центре, которые представлены на рис. 3.13.

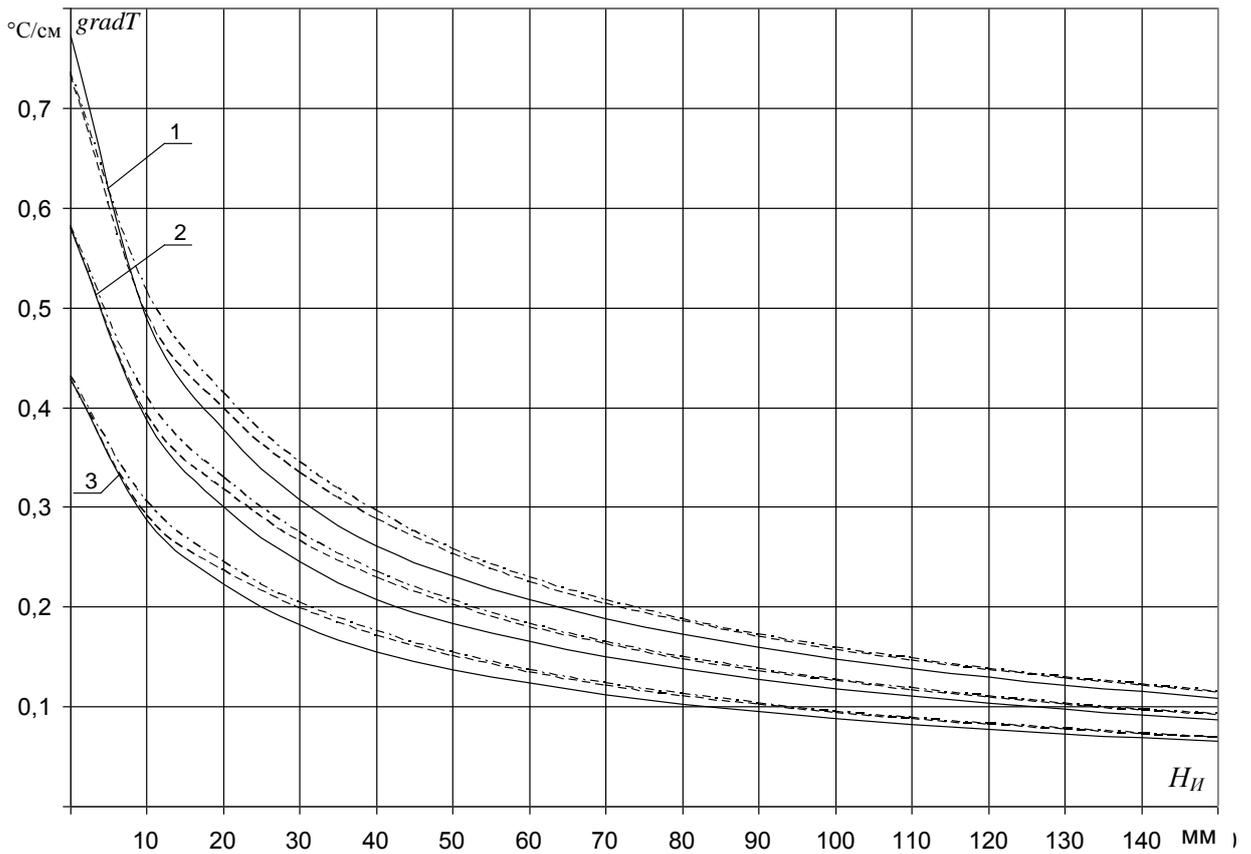


Рис. 3.13. Зависимость максимального градиента температуры в объеме изделия от толщины теплоизоляции $H_{И}$, абсолютного значения температуры в центре объекта $T_{Ц}$ и его размеров (длины): 1 – $T_{Ц} = 60$ °C; 2 – $T_{Ц} = 50$ °C; 3 – $T_{Ц} = 40$ °C; сплошная линия – блок типа ФБС 24.4.6; пунктирная линия – блок типа ФБС 12.4.6; штрих-пунктирная линия – блок ФБС 9.4.6; $T_o = 10$ °C

Полученные зависимости (рис. 3.13) позволяют сделать вывод, что величина максимальных градиентов температуры в объеме материала при выполнении ЭТО в основном зависит от толщины теплоизоляционного слоя $H_{И}$, в меньшей мере от абсолютного значения температуры в центре объекта $T_{Ц}$ и почти не зависит от

размера изделия (длины фундаментного блока). Таким образом, если первый фактор (H_{II}) приблизительно в равной степени влияет как на величину градиента температуры $gradT$ (рис. 3.13), так и на максимальную разность температур ΔT_{max}^* (рис. 3.8), то влияние других двух факторов получается заметно отличается. Это означает, что при оценке температурных условий электротепловой обработки нельзя ограничиваться расчетом только температурного поля (разд. 3.3). Обязательно требуется расчет величины и распределения градиентов температуры в объеме обрабатываемого изделия.

Важным различием между абсолютным значением температуры и ее градиента с практической точки зрения является то, что зависимости рис. 3.8 для ΔT_{max}^* позволяют сделать некоторые выводы о рациональных значениях H_{II} , как это было показано в разд. 3.3. По зависимостям рис. 3.13 (для $gradT$), сделать то же самое невозможно, т.к. критерий выбора H_{II} состоит в соблюдении условия, что фактическое значение градиента температуры не может превышать предельно допустимого значения [100,112] во избежание необратимого повреждения материала.

В целях получения более полного представления о влиянии размеров изделия на величину максимальных градиентов температуры были выполнены расчеты распределения $gradT$ на верхней поверхности для железобетонной перемычки дверных и оконных проемов и забивной сваи по аналогии с рис. 3.9 и 3.10. Полученные результаты представлены на рис. 3.14 для случаев отсутствия теплоизоляции на поверхности опалубки и ее наличия. Численные значения максимальных градиентов во всех рассмотренных случаях (рис. 3.14) практически полностью совпадают с результатами, представленными на рис. 3.13.

Характерно, что при большой длине изделия (забивная свая) максимальное значение градиента даже при наличии качественной теплоизоляции на поверхности опалубки наблюдается не в угловых точках поверхности (т.е. по концам самого длинного ребра), как в предыдущих случаях, а промежуточных точках от середины к концам ребра (рис. 3.14,г).

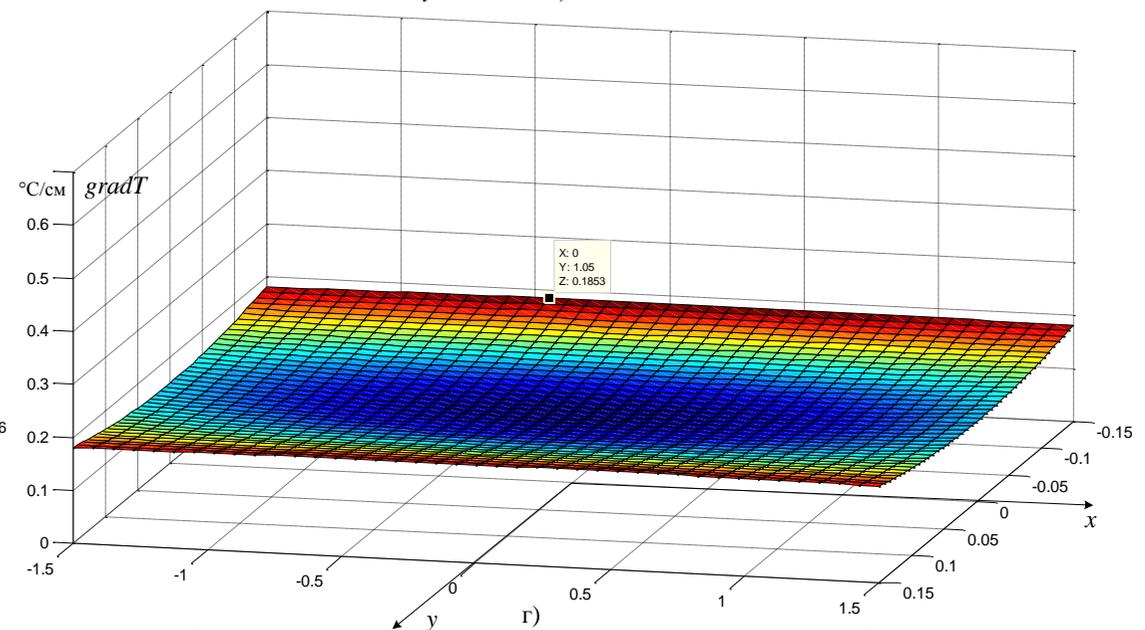
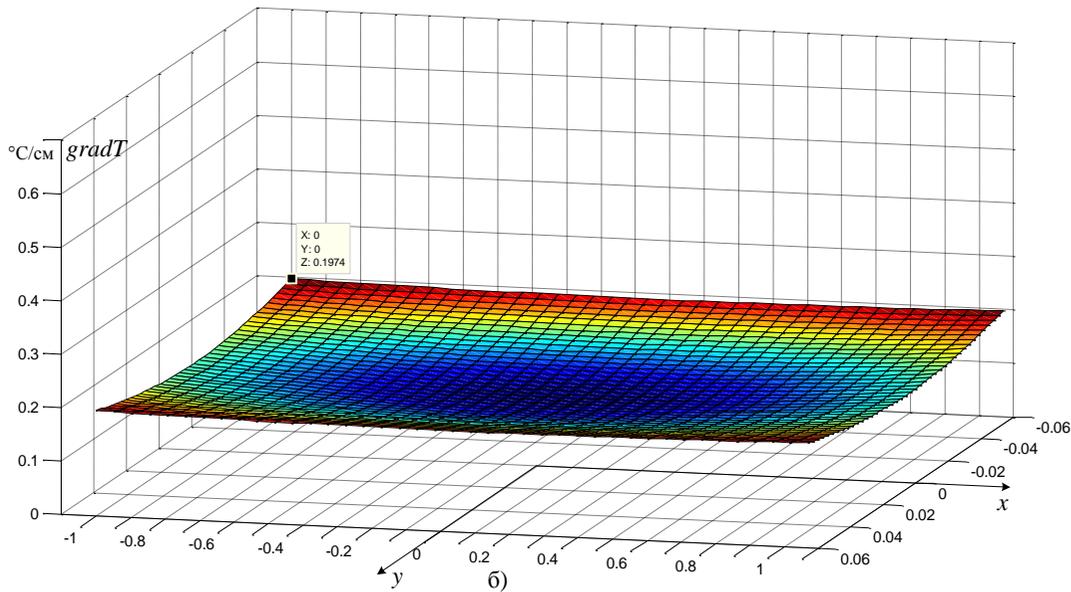
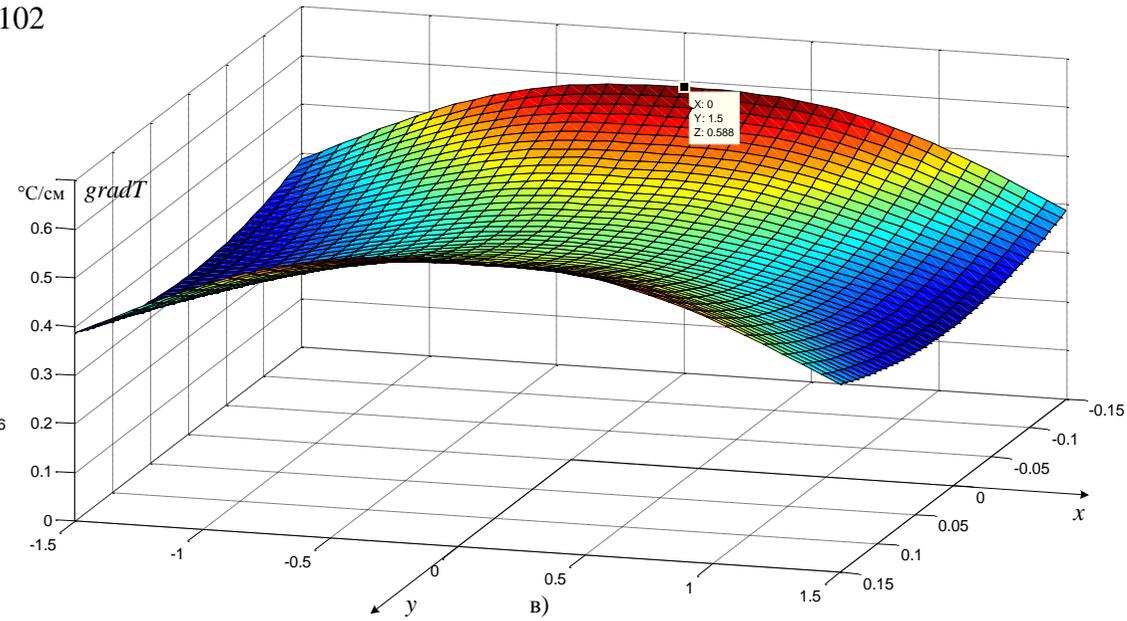
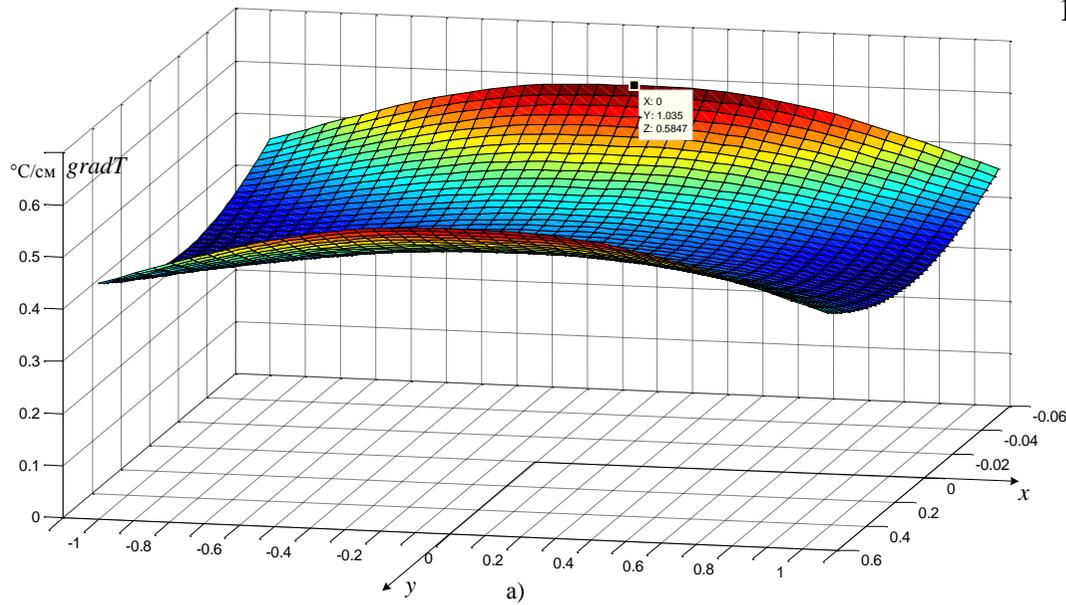


Рис. 3.14. Зависимость градиентов температуры от координат, x и y на верхней ($z=h/2$ – рис. 2.4) горизонтальной поверхности объекта для перемычки (а,б) и забивной сваи (в,г) при отсутствии (а,в) и наличии (б,г) на поверхности опалубки теплоизоляции (пенопласт) толщиной 50 мм; значения вдоль осей x и y выражены в метрах; $T_{\text{ц}} = 50^{\circ}\text{C}$; $T_o = 10^{\circ}\text{C}$

Следует отметить также, что во всех случаях, когда на опалубке имеется теплоизоляция (рис. 3.11,г, 3.12,б и г и 3.14,б и г), значение $gradT$ во всех точках самого длинного ребра имеет весьма близкие значения. Это обстоятельство, как показано в разд. 3.5, заметно упрощает оценку опасности внутренних механических напряжений, вызываемых градиентами температуры.

Установленное в результате выполненных теоретических исследований (рис. 3.11 – 3.14) слабое влияние размеров и формы изделия на величину максимальных градиентов температуры позволяет обобщить результаты вычислений в том виде, как показано на рис. 3.15.

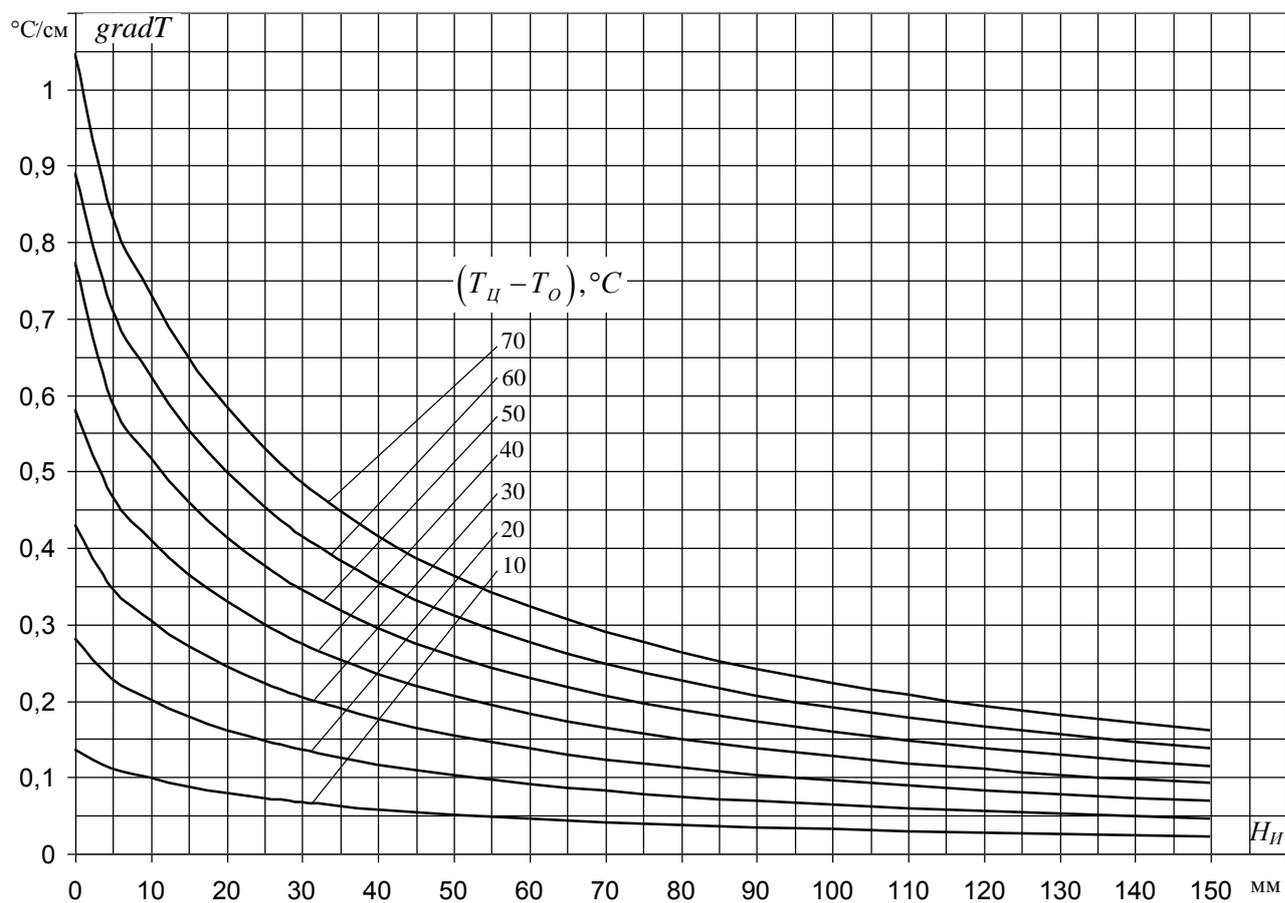


Рис. 3.15. Зависимость наибольшего значения максимального градиента температур в объеме изделия от толщины теплоизоляции H_{II} и разности температур $T_{II} - T_o$

Как показал анализ результатов вычисления градиентов температуры в объеме материала вида рис. 3.11, 3.12 и 3.14 и с построением зависимостей вида рис. 3.13 для различных объектов, наибольшее значение максимального градиента

температур, взятого из кривых вида рис. 3.13, зависит только от двух факторов: толщины теплоизоляционного слоя H_{II} и разности температур $T_{Ц} - T_o$ независимо от абсолютных значений температуры в центре объекта $T_{Ц}$ и температуры окружающей среды (воздуха) T_o . Это позволило получить зависимости, представленные на рис. 3.15 и удобные для практического применения в инженерных расчетах по определению опасности внутренних напряжений, вызванных наличием градиентов температуры, как будет показано ниже.

3.5. Определение влияния характеристик температурного поля в трехмерном пространстве объема обрабатываемого железобетонного изделия на показатели процесса ЭТО железобетонных изделий

Как показано в разд. 3.3, даже при самых благоприятных условиях проведения ЭТО железобетонных изделий всегда присутствует перепад температуры в объеме изделия, вследствие чего условия твердения бетона в различных точках будут отличаться. Поскольку величиной максимальной разности температур можно управлять, необходимо решить вопрос о максимально допустимом значении этой разности. Сделать это возможно посредством исследования процесса гидратации цемента и набора механической прочности бетона с помощью соответствующей математической модели, входящей в состав методологии рис. 1.1 и реализованной в среде MathCad в ходе ранее выполненных научных исследований и разработок [90,100].

Эти исследования были выполнены в соответствии с рекомендациями [100] и табл. 1.1 – 1.3 различных параметров графика ЭТО (рис. 1.3). На рис. 3.16 приведены результаты расчета изменения (роста) предела прочности бетона при сжатии для различных параметров ЭТО, т.е. максимальной разности температур ΔT_{\max} в зависимости от времени созревания N (сут.).

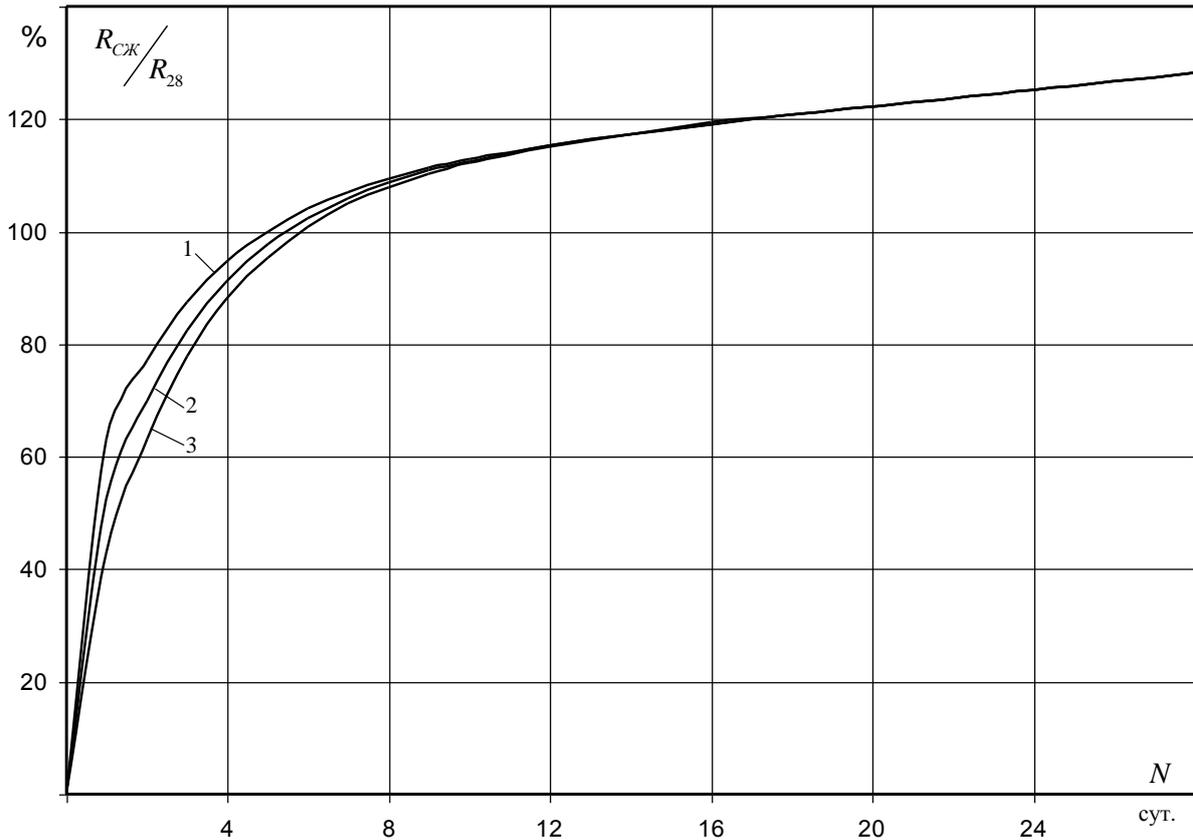


Рис. 3.16 Расчетные зависимости отношения предела прочности бетона при сжатии к нормированному значению этого параметра в возрасте 28 суток от времени твердения бетона при ЭТО с показателями $T_n = 10\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{изот} = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $T_o = 18\text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta t = 0$, $\Delta t_{нагр} = 4\text{ ч.}$, $\Delta t_{изот} = 4\text{ ч.}$, $\Delta t_{охл} = 16\text{ ч.}$: 1 – $T_{изот} = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{max} = 0\text{ }^\circ\text{C}$); 2 – $T_{изот} = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{max} = 10\text{ }^\circ\text{C}$); 3 – $T_{изот} = 30\text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{max} = 20\text{ }^\circ\text{C}$); скорость охлаждения – $2\text{ }^\circ\text{C/ч}$.

Полученные результаты (рис. 3.16) свидетельствуют о заметном влиянии температуры бетона на процесс набора им механической прочности лишь в течение относительно небольшого начального периода: от 0 до 7–8 суток: снижение величины $T_{изот}$ приводит к ощутимому замедлению процесса нарастания механической прочности бетона. Однако по мере созревания бетона различие в его механической прочности для разных $T_{изот}$ постепенно уменьшается и при $N \geq 8$ суток исчезает. Поэтому в возрасте 28 суток, соответствующем достижению бетоном нормативной механической прочности, она не зависит от величины $T_{изот}$.

Такой результат означает, что даже при весьма значительных перепадах температуры в объеме материала (например, для $T_{изот} = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{max} = 20\text{ }^\circ\text{C}$) т.е.

$\Delta T_{\max}^* = 40\%$) предел прочности бетона на сжатие после его созревания будет соответствовать нормированному значению. Характерно, что такие значения максимальной разности температур в материале можно наблюдать только при осуществлении ЭТО в условиях отсутствия теплоизоляционного слоя на поверхности опалубки (рис. 3.8), чего на практике не допускается.

Из рис. 3.16 следует, что в возрасте 28 суток предел прочности на сжатие заметно превышает (на 24–26 %) нормативное значение этого показателя, что, как было установлено ранее выполненными исследованиями, происходит вследствие активизации твердения бетона токами повышенной частоты и было учтено при разработке математической модели процесса твердения [90,100].

Отсутствие влияния величины $T_{изот}$ на механическую прочность бетона в зрелом возрасте (рис. 3.16) позволяет сделать вывод о целесообразности применения ЭТО с более низкими значениями этого параметра ($T_{изот} = 40 - 45$ °С) в целях дальнейшего снижения затрат на электроэнергию и стоимости ЭТО. Однако сделать это можно лишь в тех случаях, когда не требуется обязательно получать суточную (отпускную) прочность в размере 70 % от нормированного значения (в возрасте 28 суток) предела прочности при сжатии.

Другим важным показателем температурного поля в объеме материала обрабатываемого изделия, определяющим условия ЭТО, является значение максимальных градиентов температурного поля [100,112], результаты исследования которых представлены в разд. 3.4.

Как было показано в [100,112], наиболее опасная ситуация воздействия внутренних механических напряжений на материал, возникающих вследствие градиентов температуры, имеет место на стадии нагревания (рис. 1.3). В этот период времени механическая прочность твердеющего бетона еще невелика, и он может получить необратимые и недопустимые повреждения даже при небольших нагрузках. Поэтому представляют интерес сведения о росте предела прочности бетона при сжатии в пределах стадии нагревания с учетом возможного варьирования ее длительности. На рис. 3.17 представлены зависимости этого параметра от температуры материала при различных значениях длительности

стадии нагревания, т.е. скорости нагревания $\nu_{нагр}$, полученные посредством расчета с использованием упомянутой выше математической модели процесса гидратации цемента и набора механической прочности бетоном [90,100].

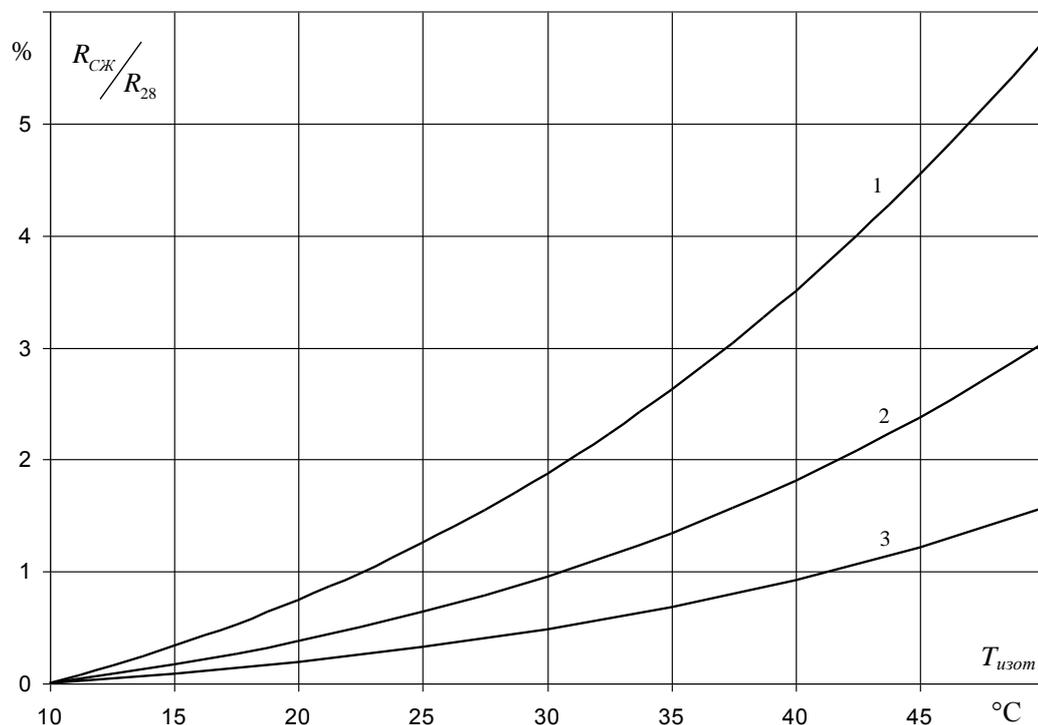


Рис. 3.17 Расчетные зависимости отношения предела прочности бетона при сжатии к нормированному значению этого параметра в возрасте 28 суток от температуры материала (температуры стадии изотермической выдержки при ЭТО с показателями $T_n = 10$ °C, $T_o = 18$ °C, $\Delta t = 0$, $\Delta t_{нагр} = 4$ ч.: 1 – $\Delta t_{нагр} = 8$ ч ($\nu_{нагр} = 5$ °C/ч.); 2 – $\Delta t_{нагр} = 4$ ч ($\nu_{нагр} = 10$ °C/ч.); 3 – $\Delta t_{нагр} = 2$ ч ($\nu_{нагр} = 20$ °C/ч.)

Как следует из полученных результатов (рис. 3.17), увеличение длительности стадии нагревания практически в прямой пропорции увеличивает механическую прочность бетона при одинаковых значениях температуры, что целесообразно учитывать при выборе режимов ЭТО.

Зависимости рис. 3.17 являются основой для оценки опасности внутренних механических напряжений вследствие неоднородных температурных полей. Как показано в [100,112] и описано в разд. 1.3, для выполнения таких оценок необходимо сравнить максимальные значения градиентов температуры в объеме материала (разд. 3.4) с характерными значениями $gradT_{np}^0$ и $gradT_{np}^v$, которые

определяются с помощью соотношений (1.2 и 1.3). Поскольку расчетное значение предела прочности бетона на сжатие выражено в относительных единицах (рис. 3.15 и 3.17), а при определении $gradT_{np}^0$ и $gradT_{np}^v$ необходимо использовать абсолютное значение, последнее удобно выразить следующим образом

$$R_{CЖ} = \left(\frac{R_{CЖ}}{R_{28}} \right) \left(\frac{R_{28}}{100} \right) = R_{CЖ}^* \left(\frac{R_{28}}{100} \right), \quad (3.3)$$

где $R_{CЖ}^* = \frac{R_{CЖ}}{R_{28}}$ – расчетное значение предела прочности при сжатии (рис. 3.16 и 3.17) в о.е.; R_{28} – нормативное значение предела прочности при сжатии бетона заданного класса в возрасте 28 суток.

При подстановке (3.3) в (1.2 и 1.3) после преобразований получены следующие выражения

$$gradT_{np}^0 = \frac{\left\{ 180,9 \cdot \lg \left[R_{CЖ}^* \left(\frac{R_{28}}{100} \right) \right] - 77,52 \right\}^{\frac{2}{3}} \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{ \left[R_{CЖ}^* \left(\frac{R_{28}}{100} \right) \right]^2 }}{E \cdot \alpha_t \cdot \ell}, \quad (3.4)$$

$$gradT_{np}^v = \frac{\left\{ 180,9 \cdot \lg \left[R_{CЖ}^* \left(\frac{R_{28}}{100} \right) \right] + 90,44 \right\}^{\frac{2}{3}} \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{ \left[R_{CЖ}^* \left(\frac{R_{28}}{100} \right) \right]^2 }}{E \cdot \alpha_t \cdot \ell}. \quad (3.5)$$

Эти формулы позволили рассчитать зависимости $gradT_{np}^0$ и $gradT_{np}^v$ от температуры материала для бетона класса В20, получившего широкое применение на практике, с использованием зависимостей рис. 3.17 для $\ell = 1$ м (значения E и α_t определяются согласно рекомендациям [100,112]). Полученные зависимости представлены на рис. 3.18 для трех значений длительности стадии нагревания, соответствующих зависимостям рис. 3.17. Важнейшей особенностью полученных результатов является то, что при длительности стадии нагревания $\Delta t_{нагр} = 2$ ч. зависимость для $gradT_{np}^0$ отсутствует вообще (рис. 3.17,а), т.е. $gradT_{np}^0 = 0$, что делает невозможным достижение абсолютно безопасного режима ЭТО на стадии нагревания. При $\Delta t_{нагр} = 4$ ч. эта зависимость существует в достаточно узком диапазоне температуры ($T = 47-50$ °С), лишь при $\Delta t_{нагр} = 8$ ч. этот диапазон заметно увеличивается.

Для того, чтобы сделать выводы об опасности градиентов температуры в объеме материала в ходе ЭТО необходимо их величину, определяемую посредством вычислений с помощью предложенной математической модели (разд. 2.3) или из рис. 3.15 сравнить с зависимостями вида рис. 3.18, полученными для конкретного изделия. Однако сделать это в настоящее время можно лишь на основе ряда допущений и предположений.

Используемая математическая модель предельных температурных градиентов [100,112], на основе которой получены соотношения (3.4) и (3.5), разработана применительно к одномерному температурному полю. В реальных изделиях градиент температуры практически во всех точках объема изделия имеет три составляющие в направлении осей координат (разд. 2.3, разд. 3.4), а суммарное значение максимального градиента температуры (на ребре объекта (разд. 3.4) колеблется в небольших пределах вдоль ребра. По-видимому, требуется дальнейшее развитие и уточнение математической модели предельных температурных градиентов [100,112] с учетом указанных обстоятельств. Однако можно предположить, что при оценке опасности воздействующих градиентов необходимо принимать только наибольшие значения максимальных градиентов на ребре, имеющем наибольшую длину (разд. 3.4, рис. 3.15). Возможно, это приведет к некоторой переоценке опасности повреждения материала внутренними механическими повреждениями, но гарантированно обеспечит безопасные условия ЭТО.

Другой важной особенностью процедуры оценки опасности градиентов температуры является то, что зависимости вида рис. 3.18 должны быть получены применительно к конкретному максимальному размеру изделия

$\ell = L$, а не $\ell = 1$ м. Для преодоления этого затруднения целесообразно использовать приведение действительного значения градиента температуры к нормированным условиям $\ell = 1$ м. Исходя из анализа структуры соотношений (3.4) и (3.5) нетрудно составить выражение для нахождения приведенного

значения градиента температуры по известному значению этого параметра для реального изделия $grad T$ (разд. 3.4, рис. 3.15):

$$grad^*T = L \cdot gradT . \quad (3.6)$$

Далее приведенное значение $grad^*T$ сравнивается с зависимостями для $gradT_{np}^0$ и $gradT_{np}^v$ (рис. 3.18) и формулируется заключение об опасности воздействующих градиентов, т.е. зависимости, представленные на рис. 3.18, превращаются в достаточно универсальный инструмент решения подобных задач.

В качестве примера были получены с использованием рис. 3.15 и выражения (3.6) зависимости приведенного значения градиента температуры от температуры материала при двух значениях толщины теплоизоляционного слоя на поверхности опалубки $H_{II} = 0$ и 5 см, которые также представлены на рис. 3.18. Эти зависимости определены для характерных объектов: фундаментный блок ФБС 12.4.6 ($L = 1,18$ м), железобетонная перемычка 9ПБ21-8-п ($L = 2,07$ м), забивная свая ($L = 3$ м).

Как показано в [100,112] и отмечено в главе 1, для того, чтобы исключить повреждение материала внутренними напряжениями в процессе ЭТО необходимо, по крайней мере, обеспечить соблюдение условия $grad^*T < gradT_{np}^v$. Анализ сведений рис. 3.18 позволяет сделать вывод, что при $\Delta t_{нагр} = 2$ ч. добиться выполнения этого условия не удастся даже при наличии теплоизоляционного слоя достаточно большой толщины (5 см) ни в одном из рассматриваемых случаев и такая длительность стадии нагревания недопустима. При $\Delta t_{нагр} = 4$ ч. безопасный режим ЭТО обеспечивается лишь для одного объекта – ФБС 12.4.6 (очевидно и для ФБС 9.4.6) и только при наличии теплоизоляции на поверхности опалубки.

В случае $\Delta t_{нагр} = 8$ ч. безопасные условия ЭТО обеспечиваются для всех объектов при использовании опалубки с теплоизоляцией, а для ФБС 12.4.6 (ФБС 9.4.6) даже при отсутствии теплоизоляции.

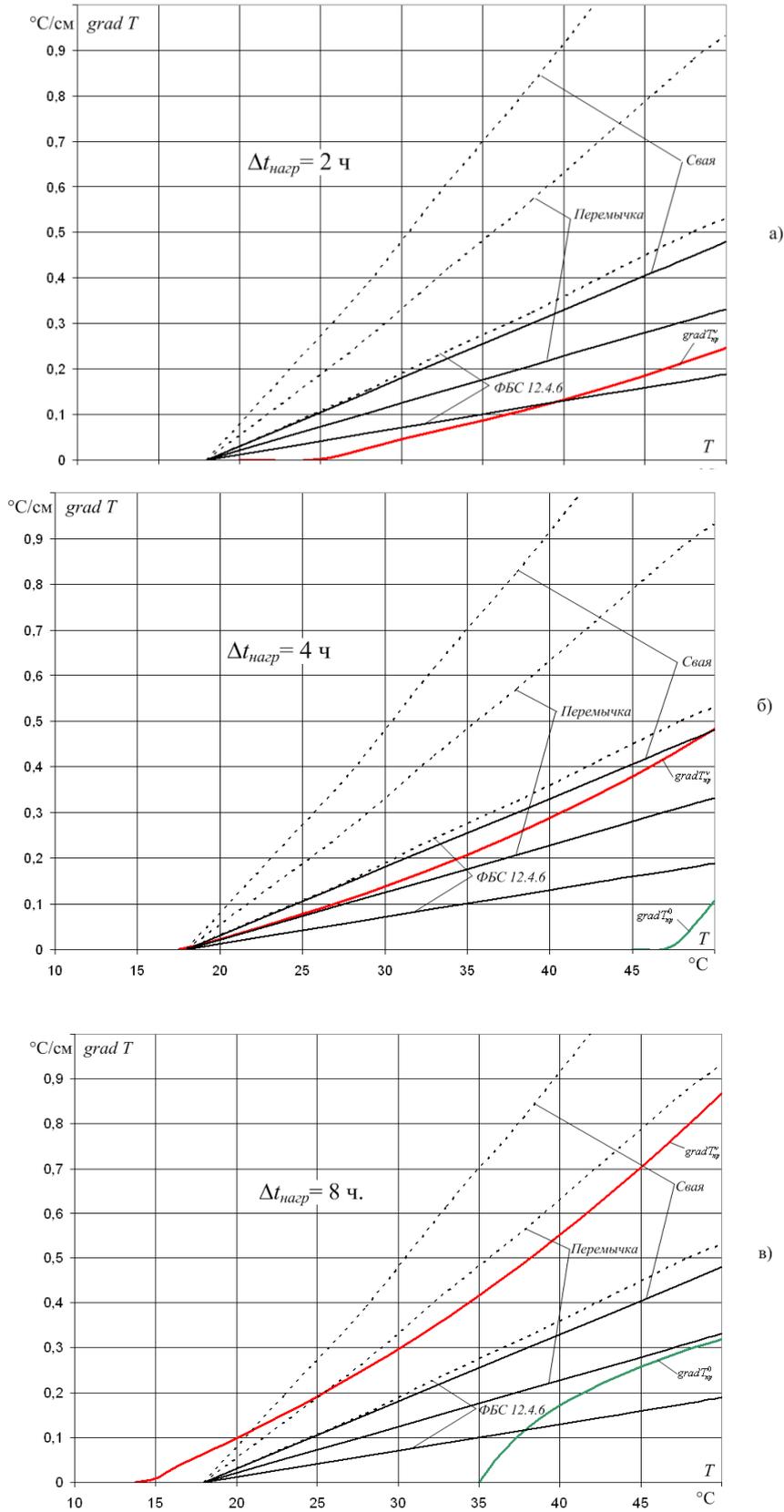


Рис. 3.18. Сравнение фактических значений градиентов температуры с граничными значениями (цветные линии) при различной длительности стадии нагрева $\Delta t_{нагр}$ для разных объектов ЭТО при отсутствии теплоизоляционного слоя на поверхности опалубки (черные пунктирные линии) при наличии теплоизоляционного слоя (пенопласт) толщиной 5 см (черные сплошные линии)

Полученные результаты (рис. 3.18) позволяют сделать вывод о существовании минимально допустимой величины длительности стадии нагревания $\Delta t_{нагр}$ (максимальной скорости нагревания), численное значение которой зависит от сочетания большого набора различных параметров: класс бетона, размеры изделия, начальная температура бетона, температура окружающей среды, температура изотермической стадии, конструкция и теплофизические показатели материалов опалубки. Поэтому задача определения такого значения должна решаться индивидуально применительно к конкретному изделию и условий выполнения ЭТО посредством получения зависимостей вида рис. 3.18. Причем, в качестве таких условий целесообразно использовать такие значения температурных показателей, которые наблюдаются в зимнее время, что позволит избежать ошибок в определении безопасных режимов ЭТО.

В результате расчетов с построением зависимостей вида рис. 3.18, исходя из условия $grad^*T < gradT_{np}^v$, были определены минимально допустимые значения длительности стадии нагревания (табл. 3.1) для различных изделий при $T_n = 3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{изот} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_o = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ для класса В20 и опалубки, выполненной из ламинированной фанеры толщиной 2 см с теплоизоляционным слоем (пенопласт) на поверхности толщиной 5 см. Как видно из табл. 3.1, обращают на себя внимание достаточно большие значения минимально допустимой длительности стадии нагревания. Это соответствует точке зрения известного специалиста в сфере электротепловой обработки бетона академика РААСН Б.А. Крылова о необходимости применения в таком процессе по возможности более «мягких» режимов разогрева, т.е. нагрева материала с предельно малой скоростью роста температуры [1,120].

Минимально допустимые значения длительности стадии нагревания $\Delta t_{нагр}$ при ЭТО различных изделий, ч.

Таблица 3.1

ФБС 9.4.6	ФБС 12.4.6	Перемычка, ФБС 24.4.6	Свая
3,8	4,5	5,2	5,7

Из анализа сведений рис. 3.18 и табл. 3.1 нетрудно сделать вывод, что в летних условиях, когда температура может достигать значений: $T_n = 15 - 23$ °С, $T_o = 20 - 26$ °С, длительность стадии нагревания в целях ускорения процесса изготовления железобетонных изделий может быть заметно снижена и должна определяться индивидуально [120-122]. Кроме этого, существует возможность уменьшения длительности стадии нагревания посредством управления скоростью разогрева в пределах этой стадии ЭТО, что является темой дальнейших научно-технических разработок.

3.6. Выводы по главе 3

1. Предложенная программно-алгоритмическая реализация (разд. 3.2) численно-аналитической методики расчета температурного поля в трехмерном пространстве (разд. 2.3) в среде MATLAB представляет собой удобный, достаточно универсальный и эффективный инструмент исследования температурных полей в объеме железобетонных изделий в процессе их изготовления с применением ЭТО токами повышенной частоты в целях создания необходимого оборудования и выбора режимов процесса ЭТО.
2. Этот инструмент доступен широкому кругу пользователей, т.к. не требует от них специальных знаний и подготовки, что выгодно отличает его от существующих численных методов расчета температурных полей (например, метод конечных элементов), освоение и применение которых представляет сложную задачу, решение которой, как правило, требует помощи специалиста.
3. Выполненные теоретические исследования показывают, что использование ЭТО при изготовлении железобетонных изделий обеспечивает существенно более высокую однородность температурного поля, чем при применении традиционных методов тепловой обработки

(например, ТВО), однако даже в этом случае принципиально невозможно добиться абсолютно однородного температурного поля, а правильной и реальной постановкой задачи следует считать получение такой неоднородности, при которой не будет возникать опасных ситуаций для обрабатываемого изделия.

4. Нежелательные последствия неоднородного температурного поля в объеме изделия в ходе его тепловой обработке определяются величиной двух важнейших показателей: максимальная разность температур в объеме материала ΔT_{\max} (ΔT_{\max}^*) и максимальная величина градиентов температуры $grad T$.
5. Параметр ΔT_{\max} показывает насколько отличаются условия твердения бетона и набора им механической прочности в точках объема изделия с минимальной и максимальной температурой; выполненные теоретические изделия показывают, что даже существенные значения этого параметра (например, $\Delta T_{\max} = 20^\circ\text{C}$) не сказываются на механической прочности бетона в возрасте свыше 8 – 9 суток; величина этого параметра влияет на процесс роста предела прочности бетона на сжатие только в период до 7 – 8 суток.
6. Значительно более жесткие ограничения на параметры ЭТО определяются величиной максимальных градиентов температуры $grad T$, опасность которых состоит в появлении внутренних механических напряжений способных вызвать недопустимые повреждения материала (бетона), особенно, на стадии нагревания, когда бетон еще не успел набрать достаточно высокую механическую прочность; выполненные теоретические исследования позволили оценить минимально допустимые значения длительности стадии нагревания (табл. 3.1), при соблюдении которых устраняется опасность повреждения материала изделия внутренними механическими напряжениями.

7. Эффективными средствами управления неоднородностью температурного поля в процессе ЭТО являются изменение распределения электрического поля в объеме материала изделия и параметров теплоизоляционного слоя на поверхности опалубки; на основании выполненных теоретических исследований рекомендуется в общем случае применять теплоизоляцию (пенопласт) толщиной $H_{II} = 4 - 6$ см; целесообразно продолжение исследований по снижению неоднородности температурных полей в обрабатываемых изделиях регулированием электрического поля и параметров теплоизоляции.
8. Вопреки распространённому мнению, однородное выделение тепла в объеме материала является далеко не самым лучшим вариантом электротермической обработки, и значительно более однородное температурное поле в стационарном режиме достигается в том случае, если имеет место снижение объёмной плотности мощности в направлении распространения теплового потока.
9. Требуется дальнейшее развитие теории температурных полей в объеме материала при электротермической обработке с учётом различных реальных факторов: нестационарного режима на стадиях разогрева и охлаждения, наличия различных и переменных во времени и пространстве граничных условий, распространения теплового потока в изделиях с переменным поперечным сечением, учета изменения электрической проводимости бетона в зависимости от температуры и времени и др.

Глава 4. Разработка опытно-промышленных установок для изготовления железобетонных изделий с применением электротепловой обработки токами повышенной частоты.

Результаты теоретических исследований (гл. 3), проведенных с использованием разработанных расчетных методик (гл. 2), а также методик, входящих в состав общей методологии (гл. 1, рис. 1.1) создания и применения процессов ЭТО токами повышенной частоты при изготовлении железобетонных изделий, позволяют выполнить конструирование, изготовление опытно-промышленных установок такого назначения, разработать методику экспериментальных исследований характеристик процессов ЭТО реальных изделий.

4.1. Выбор и обоснование вариантов опытно-промышленных установок для изготовления железобетонных изделий с применением ЭТО электродным методом токами повышенной частоты

Анализ существующего производственного процесса на предприятиях сборного железобетона, а также результатов теоретических исследований, представленных в гл. 3, позволяет сделать вывод, что в качестве вариантов опытно-промышленного применения ЭТО электродным методом токами повышенной частоты периодического действия с использованием источников питания на основе полупроводниковых преобразователей напряжения следует выбрать следующие направления:

- изготовление фундаментных блоков;
- изготовление железобетонных перемычек дверных и оконных проемов;
- изготовление железобетонных свай;
- ЭТО железобетонных колодезных колец, изготавливаемых по безопалубочной технологии.

Выбор перечисленных направлений опытно-промышленного применения ЭТО электродным методом обусловлен следующими соображениями. Фундаментные блоки являются одним из наиболее распространенных и широко применяемых железобетонных изделий, для изготовления которых целесообразно применять ЭТО токами повышенной частоты. Изготовление таких изделий часто производится на полигонных установках, которые, обладая достаточно высокой стоимостью и сложностями в эксплуатации, сами по себе имеют наиболее низкую энергетическую эффективность ТВО (особенно в зимнее время), т.к. располагаются на открытом воздухе. Кроме этого, такие изделия имеют невысокие значения модуля поверхности, т.е. являются массивными, что затрудняет их прогрев при поступлении тепла извне и дополнительно снижает эффективность ТВО. В результате стоимость тепловой обработки и себестоимость изделий достигает наивысших значений [1,4-6,100,102,103]. Поэтому изготовление этих изделий с использованием ЭТО токами повышенной частоты должно дать значительный технический и экономический эффект.

Следующим примером использования ЭТО электродным методом, рассмотренным в настоящей работе, является применение такого способа тепловой обработки при изготовлении железобетонных перемычек оконных и дверных проемов. Внимание к такому простому изделию обусловлено весьма широким его распространением на практике, а также тем обстоятельством, что такие детали являются, например, непрофильными изделиями для предприятий крупнопанельного домостроения. На таких предприятиях нередко отсутствует необходимая оснастка для их изготовления. Тем не менее, современным домостроительным компаниям крупнопанельного домостроения приходится периодически срочно изготавливать эти изделия небольшими сериями для возведения различных вспомогательных объектов, приспособив для этого оснастку (опалубку), предназначенную для изготовления других изделий. Производство железобетонных перемычек также было бы весьма выгодно

предприятиям малого и среднего бизнеса при наличии недорогого оборудования и энергосберегающей технологии производства.

Как показано в гл. 3, еще одним перспективным направлением использования ЭТО токами повышенной частоты является применение такого способа тепловой обработки при производстве забивных свай. С одной стороны, свайные фундаменты получают все более широкое распространение и производство железобетонных забивных свай год от года постоянно нарастает. С другой, их изготовление сопряжено с рядом трудностей и недостатков, как отмечено в гл. 3. Учитывая, что длина сваи может достигать внушительных значений (например, при поперечном сечении сваи 400х400 до $l = 20$ м), возникают немалые проблемы при их изготовлении с использованием ТВО. В частности, требуются пропарочные камеры больших размеров, опалубка имеет большую массу, что требует значительных затрат тепловой энергии на ее разогрев (ее доля имеет величину более 30 %) и приводит к еще большему снижению и без того невысокой энергетической эффективности ТВО, необходимо наличие подъемно-транспортного оборудования достаточной грузоподъемности для перемещения этой опалубки в пропарочную камеру после укладки бетона и обратно после завершения ТВО и др. Нередко для изготовления забивных свай используются полигонные установки, о низкой энергетической эффективности уже было сказано выше. Наконец, изготовление таких популярных у потребителей изделий почти недоступно предприятиям малого и среднего бизнеса. Применение электротепловой обработки при изготовлении забивных свай позволило бы устранить отмеченные недостатки.

Железобетонные колодезные кольца являются одним из наиболее распространенных изделий и пользуются большим спросом как со стороны различных предприятий и организаций, так и со стороны населения. По этой причине такие изделия крайне популярны среди производителей, представляющих малый и средний бизнес. Важным преимуществом таких изделий является то, что они в настоящее время изготавливаются, в основном, с использованием безопалубочной технологии. В результате этого, при выполнении

их тепловой обработки отсутствуют бесполезные затраты энергии на разогрев опалубки [1,100,102,103].

Из-за отсутствия доступной тепловой обработки многие предприниматели средней полосы России вынуждены в холодное время года либо полностью прекращать производство таких изделий, либо значительно снижать его объёмы. В остальное время года вследствие использования естественного твердения бетона они вынуждены мириться с низкой производительностью своих предприятий и снижением качества готовых изделий [121]. В итоге они имеют ущерб от упущенной выгоды, определение которого представляет собой серьезную проблему и по приближённым оценкам может значительно превышать доходы от предпринимательской деятельности [121].

Однако, даже на крупных предприятиях строительной отрасли, имеющих в своем распоряжении ТВО, изготовление таких изделий сопряжено с рядом трудностей. Например, при транспортировке отформованных изделий в пропарочную камеру от неизбежных при этом толчков и сотрясений достаточно часто наблюдается частичное или полное разрушение изделия. Это приводит к снижению производительности производства и качества изделий, ухудшению технико-экономических показателей, значительным затратам ручного труда по ремонту и восстановлению испорченных изделий.

Перспективным решением этой проблемы может стать широкое применение на малых и средних предприятиях строительной отрасли ЭТО таких железобетонных изделий с использованием источников питания на основе полупроводниковых преобразователей напряжения. Предварительные эксперименты, выполненные на доборных элементах железобетонных колодцев, показали высокую эффективность такого способа тепловой обработки [121]. Однако ее широкому применению препятствует отсутствие необходимого и удобного оборудования и оснастки для осуществления ЭТО токами повышенной частоты в производственных условиях.

В любом из рассмотренных вариантов применения ЭТО опытно-промышленная установка включает в себя два основных элемента – во-первых,

опалубку или оснастку специальной конструкции, выполненную из электроизоляционного материала, позволяющую осуществлять ЭТО электродным методом, и снабженную теплоизоляцией, во-вторых, источник питания на основе транзисторного преобразователя напряжения, выполненного с применением мощных высоковольтных IGBT транзисторов.

4.2. Разработка опалубки (оснастки) опытно-промышленных установок для изготовления железобетонных изделий с применением ЭТО

В целях экспериментальной проверки и исследования показателей и характеристик технологического процесса изготовления, указанных выше объектов, с применением ЭТО токами повышенной частоты были разработаны и изготовлены соответствующие варианты опалубки и оснастки. На рис. 4.1 представлен сборочный чертеж опалубки для изготовления фундаментных блоков с применением ЭТО токами повышенной частоты электродным методом.

Опалубка состоит из днища 5 (рис. 4.1), двух боковых стенок 6, одной неподвижной торцевой стенки 7 и одной передвижной стенки 8 с тремя распорками 9 различной длины. Все перечисленные элементы имеют принципиально одинаковую конструкцию, как показано на рис. 4.2. Внутренняя поверхность каждого их них, которая при изготовлении железобетонного изделия контактирует со свежим бетоном, выполнена из ламинированной фанеры толщиной 20 мм. Как известно, этот материал прекрасно зарекомендовал себя в монолитном домостроении, где он широко применяется в конструкции передвижной и разборной опалубки. Такая опалубка, несмотря на тяжелые условия эксплуатации, имеет достаточно продолжительные сроки службы. Одновременно, этот материал обладает хорошими электроизоляционными свойствами, что делает его пригодным для изготовления железобетонных изделий с помощью электротепловой обработки электродным методом. Для придания жесткости каждой детали опалубки ламинированная фанера закреплена на

каркасе, выполненном из деревянного соснового бруса сечением 50x100 мм (рис. 4.2).

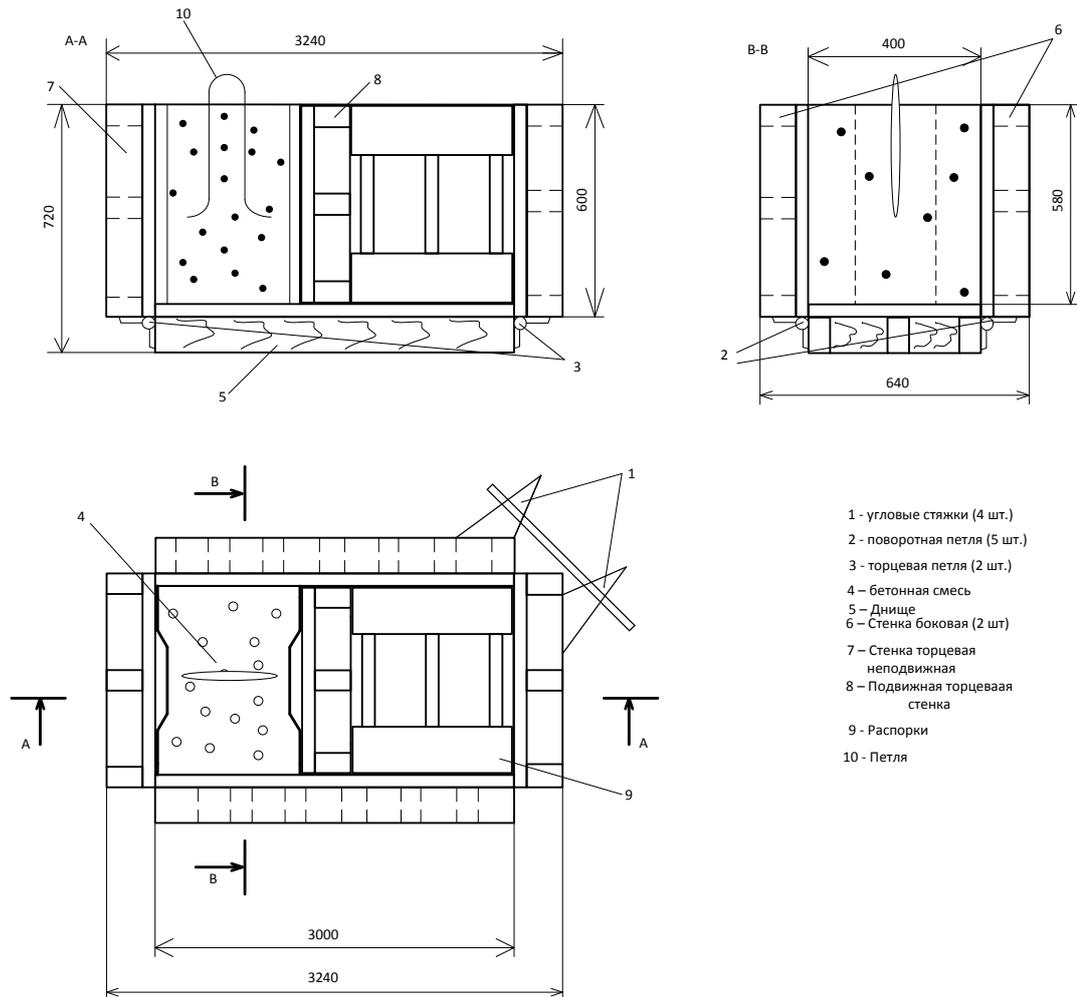


Рис. 4.1. Конструкция опалубки для изготовления фундаментных блоки с применением ЭТО электродным методом токами повышенной частоты: 1 – угловые стяжки (4 шт.); 2 – поворотная петля (5 шт.); 3 – торцевая петля (2 шт.); 4 – бетонная смесь; 5 – днище; 6 – стенка боковая (2 шт.); 7 – стенка торцевая неподвижная; 8 – подвижная торцевая стенка; 9 – распорки; 10 – петля

В просветы каркаса уложены листы пенопласта толщиной 50 мм, а с наружной стороны каркаса установлена декоративная обшивка из фанеры толщиной 5 мм (рис. 4.2). Такая конструкция деталей опалубки обеспечивает ей высокие теплоизолирующие качества, что является обязательным условием качественной и эффективной электротепловой обработки железобетонных изделий электродным методом [101]. Боковые стенки 6 и неподвижная торцевая 7 прикреплены к днищу с помощью поворотных петель. Поэтому они легко и быстро откидываются в разные стороны вплоть до горизонтального положения при распалубке готового изделия. В рабочем состоянии стенки приводятся в

вертикальное положение и скрепляются с помощью четырех угловых стяжек и трех поперечных, которые установлены в верхней части боковых стенок равномерно по длине опалубки.

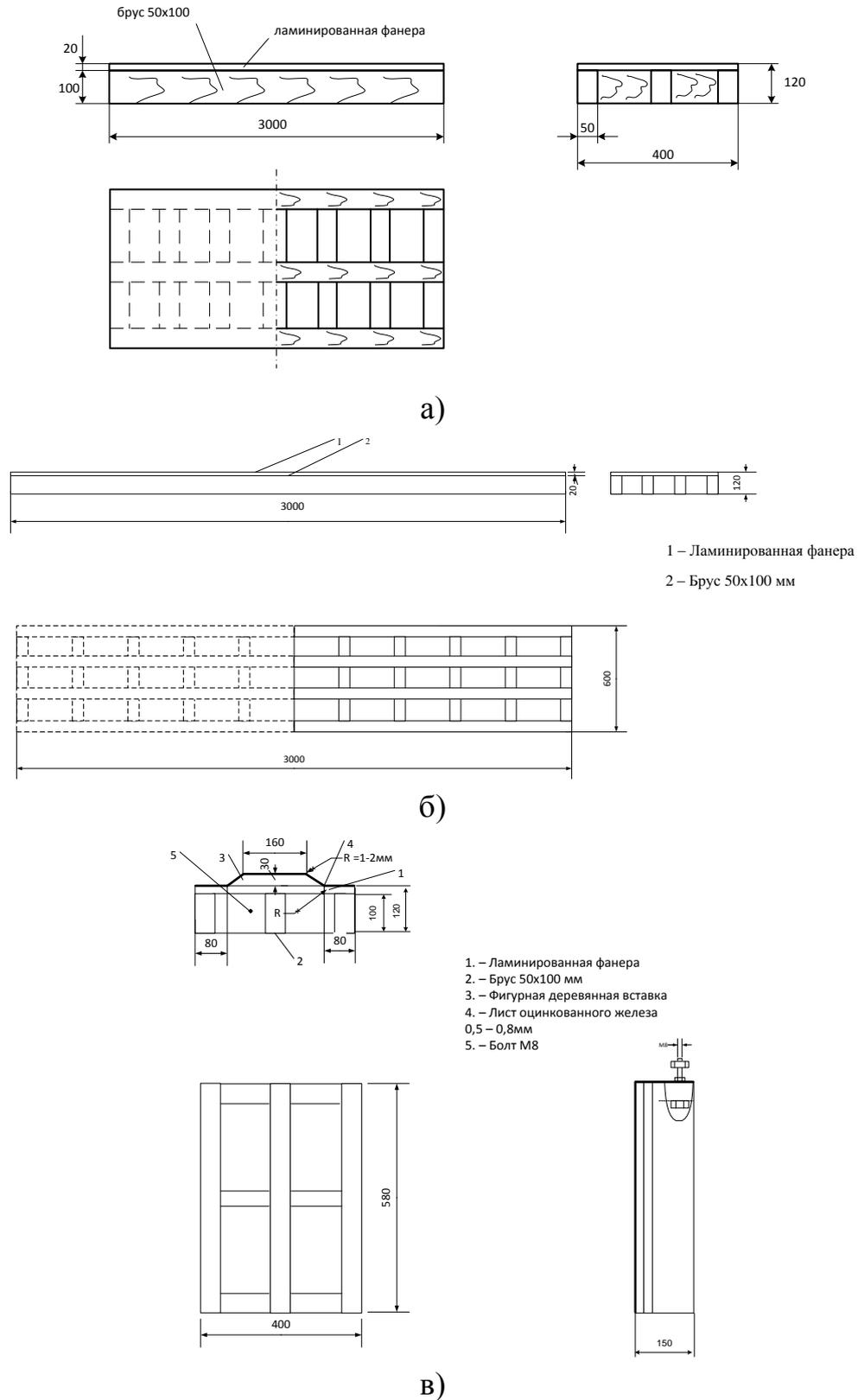


Рис. 4.2. Конструкция деталей опалубки для изготовления фундаментных блоков: а) – днище; б) – боковые стенки; в) – торцевые стенки

Передвижная торцевая стенка 8 в поперечном направлении фиксируется боковыми стенками 6, а в продольном распоркой 9. При этом распорка 9 одним концом упирается в тыльную плоскую поверхность передвижной стенки 8, а другим в плоскую поверхность второй неподвижной торцевой стенки опалубки 6 (рис. 4.1 – расположена в правой части опалубки по чертежу). Благодаря такой конструкции опалубки передвижная стенка надежно удерживается в нужном положении, располагаясь вертикально, при укладке бетонной смеси 4 и в ходе дальнейшей электротепловой обработки. Поочередно применяя три распорки 9 разной длины, имеющиеся в комплекте, с помощью этой опалубки можно изготавливать блоки длиной 880 мм и 1180 мм и 2380 мм. Таким образом, рассматриваемая опалубка (рис. 4.1) позволяет изготавливать фундаментные блоки типа ФБС 9.4.6-Т (модуль поверхности – $M_{\text{П}} = 10,7 \text{ м}^2$), ФБС 12.4.6-Т ($M_{\text{П}} = 10,14 \text{ м}^2$) и ФБС 24.4.6-Т ($M_{\text{П}} = 9,3 \text{ м}^2$) (ГОСТ 13579-78). Поверхности торцевых стенок 6 и 8, обращенные к бетонной смеси 4, снабжены специальными вставками, которые придают торцевым поверхностям фундаментного блока необходимую форму в соответствии с требованиями ГОСТ 13579-78. Кроме того, эти поверхности имеют покрытие, выполненное из оцинкованной стали толщиной 0,8 мм (рис. 4.2,б), что позволяет использовать две такие стальные пластины, расположенные по торцам изделия в качестве электродов для осуществления ЭТО фундаментного блока электродным методом. В верхней части каждой торцевой стенки установлены шпильки (болт) М8 для надежного электрического подключения проводников, подходящих к опалубке от источника питания, к электродам, т.е. стальным пластинам (рис. 4.2,б).

Анализ представленных конструкций опалубки и ее элементов позволяет сделать заключение, что из двух вариантов ЭТО рассматриваемого изделия, для которых выполнены теоретические исследования в гл. 3: разогрев пропусканием электрического тока между боковыми поверхностями (т.е. в направлении ширины) и разогрев при прохождении тока между торцевыми поверхностями (т.е. по длине), выбран второй вариант. Как показали теоретические исследования

(гл. 3), при использовании такого варианта существенно уменьшается величина электрического тока при выполнении ЭТО, что позволяет заметно упростить конструкцию источника питания и проводников для подключения его к опалубке. Снижается негативное влияние качества контактов в электрической цепи с обрабатываемым изделием на режимы работы установки (например, в виде перегрева контактов и дополнительных потерь энергии). Значительно уменьшаются размеры электродов, упрощаются конструкция опалубки и ее эксплуатация, снижается стоимость установки. Единственным недостатком такого варианта электроразогрева рассматриваемого изделия является частичное электрическое шунтирование небольшого объема бетона в месте расположения арматуры (монтажные петли). В результате такого эффекта в участке материала снижается напряженность электрического поля и мощность объемного тепловыделения при ЭТО электродным методом согласно (2.1). Однако, как показали теоретические исследования (гл. 3) с применением предложенных в настоящей работе расчетных методик (разд. 2.1), этот фактор не вызывает появления заметной неоднородности температурного поля в объеме материала изделия в ходе ЭТО, которая может привести к неприятным последствиям, например, к появлению опасных внутренних механических напряжений.

На рис. 4.3 представлен внешний вид опалубки для изготовления фундаментных блоков с использованием ЭТО электродным методом.

Опыт, полученный при создании и применении опалубки для изготовления фундаментных блоков (рис. 4.1, рис. 4.3), а также результаты теоретических исследований, приведенных в гл. 3, явились основой для разработки опалубки, предназначенной для изготовления железобетонных перемычек с помощью ЭТО электродным методом. Как и в предыдущем случае (рис. 4.1), опалубка выполнена из диэлектрических материалов и снабжена электродами для осуществления ЭТО электродным методом. Сборочный чертеж (эскиз) такой опалубки, предназначенной для изготовления железобетонной перемычки типа 9ПБ21-8-п (размеры – 120x190x2070, $M_{II} = 28,16 \text{ м}^{-1}$), представлен на рис. 4.4. Перемычки такого типа в настоящее время пользуются наибольшим спросом.



Рис. 4.3. Внешний вид опалубки для изготовления фундаментных блоков с использованием ЭТО электродным методом (опалубка находится в рабочем состоянии, т.е. подготовлена к укладке бетонной смеси для изготовления блока типа ФБС 9.4.6-Т)

Опалубка для железобетонной перемычки (рис. 4.4) разработана и изготовлена по тем же принципам, что и выше описанное устройство для производства фундаментных блоков (рис. 4.1 – 4.3). Она выполнена с применением ламинированной фанеры толщиной 20 мм, снабженной снаружи каркасом из деревянного бруса сечением 50x100 мм, а элементы опалубки соединены между собой петлями и стяжками.

Отличия заключаются в том, что электроды в виде пластин из оцинкованной стали толщиной 0,8 мм (рис. 4.4) размещены не на торцевых, как в предыдущем случае (рис. 4.1 – 4.3), а на боковых внутренних поверхностях опалубки. Выбор такой конструкции электродной системы обусловлен присутствием в составе железобетонного изделия арматуры в виде плоской сетки, расположенной по центру вдоль изделия (рис. 4.4). Поэтому при осуществлении ЭТО электродным методом электрический ток протекает в толще бетона между боковыми гранями изделия перпендикулярно плоскости арматурной сетки. Как показали предварительные экспериментальные исследования [121], в такой ситуации арматура практически не оказывает влияния на температурные характеристики и другие параметры процесса ЭТО железобетонных изделий электродным методом. При попытке выполнить ЭТО посредством пропускания электрического тока

вдоль изделия (рис. 4.4), расположив электроды по его торцам, как в предыдущем случае (рис. 4.1 – 4.3), значительная часть изделия была бы электрически зашунтирована через малое электрическое сопротивление арматуры. В этой ситуации выполнить ЭТО было бы невозможно из-за отсутствия тепловыделения в объеме материала.

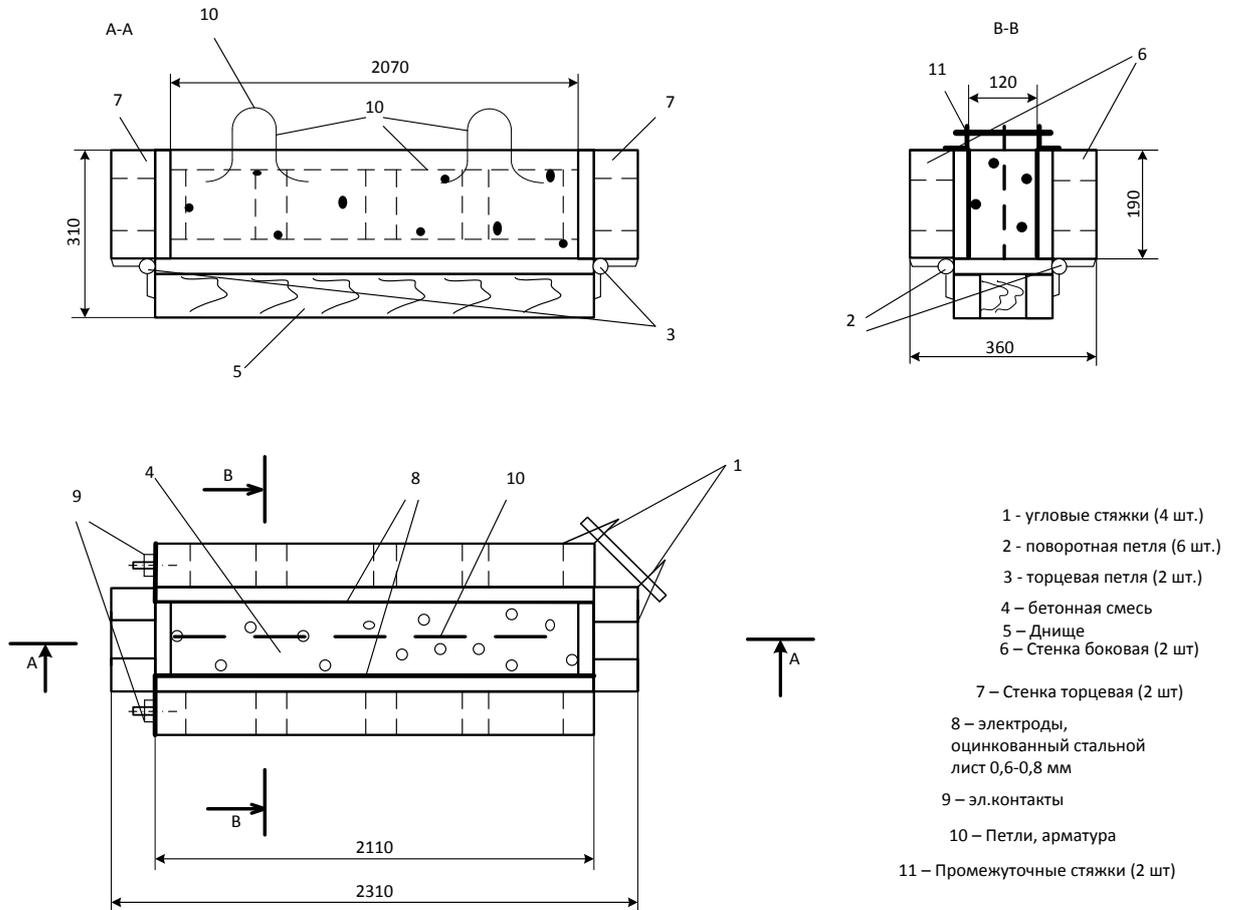


Рис. 4.4. Конструкция опалубки для изготовления железобетонной перемычки типа 9ПБ21-8-п с помощью ЭТО электродным методом

С другой стороны, как следует из результатов теоретических исследований (гл. 3), при выполнении ЭТО рассматриваемого изделия (рис. 4.4) требуется сравнительно небольшая мощность (около 500 Вт) и не возникают проблемы, связанные с подачей и коммутацией больших электрических токов для выбранной электрической схемы. Важным преимуществом принятой электродной системы (рис. 4.4) является то, что электрическое напряжение, приложенное к электродам, в ходе ЭТО не превышает характерного значения – 40 В (см. гл. 3). Это обстоятельство существенно упрощает решение вопросов электробезопасности при эксплуатации установки [100].

Другой отличительной особенностью опалубки для изготовления железобетонной перемычки является то, что первоначально в просветы каркаса не была уложена теплоизоляция (например, в виде листов пенопласта, как в предыдущем случае – рис. 4.1), а на поверхность каркаса не была установлена наружная обшивка. Это было сделано для того, чтобы посредством эксперимента, изменяя толщину применяемого теплоизоляционного материала, выполнить проверку правильности результатов теоретических исследований (см. гл. 3) влияния наличия и качества теплоизоляции на показатели и характеристики процесса ЭТО. На рис. 4.5 представлен внешний вид опалубки.



Рис. 4.5. Внешний вид опалубки для изготовления железобетонных перемычек типа 9ПБ21-8-п с использованием ЭТО

Как отмечено в разд. 4.1, перспективным направлением использования ЭТО токами повышенной частоты является применение такого способа тепловой

обработки при производстве забивных свай. На рис. 4.6 показана конструкция одного из наиболее распространенных вариантов такого изделия.

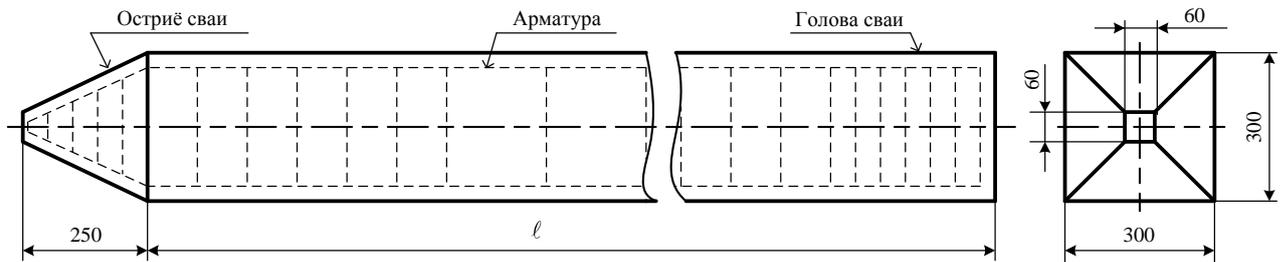


Рис. 4.6. Конструкция железобетонной забивной сваи сплошного квадратного сечения 300х300 мм (на чертеже не показаны монтажные петли, $l = 3 \div 15$ м – длина сваи)

Особенностью забивных свай является то, что эти изделия относятся к числу сильно армированных, имеющих арматуру в виде пространственного каркаса с неравномерным распределением поперечных армирующих элементов по длине сваи (рис. 4.6). Это обстоятельство заметно осложняет применение электротепловой обработки изделия электродным методом.

В целях экспериментальной оценки возможности применения ЭТО электродным методом при изготовлении железобетонных свай была разработана и изготовлена опытная опалубка, конструкция которой представлена на рис. 4.7. Эта опалубка позволяет изготавливать сваи сечением 300х300 мм длиной $l = 3$ м ($M_{II} = 14 \text{ м}^{-1}$) (ГОСТ 19804-2012). Анализ представленной конструкции позволяет сделать вывод, что она мало чем отличается от рассмотренных выше (рис. 4.1 и рис. 4.4), в дополнительных пояснениях уже не нуждается и необходимо лишь отметить некоторые особенности. Одна из торцевых стенок опалубки (поз. 4 – рис. 4.7) имеет пирамидальную форму для того, чтобы сформировать необходимую форму и размеры острия сваи (рис. 4.6). Другим отличием является конструкция электродной системы. Как следует из рис. 4.7, одним из электродов является пластина из оцинкованного железа, установленная на днище опалубки и занимающая всю его поверхность. Второй электрод расположен на крышке опалубке, устанавливаемой сверху, выполнен в виде

набора эластичных контактов, электрически соединенных между собой (на рис. 4.7 не показаны из-за малых размеров). Эти контакты имеют форму круга диаметром 5-7 см, расположены по центру и вдоль крышки таким образом, чтобы каждый из этих контактов находился посередине ячейки, образованной элементами арматуры.

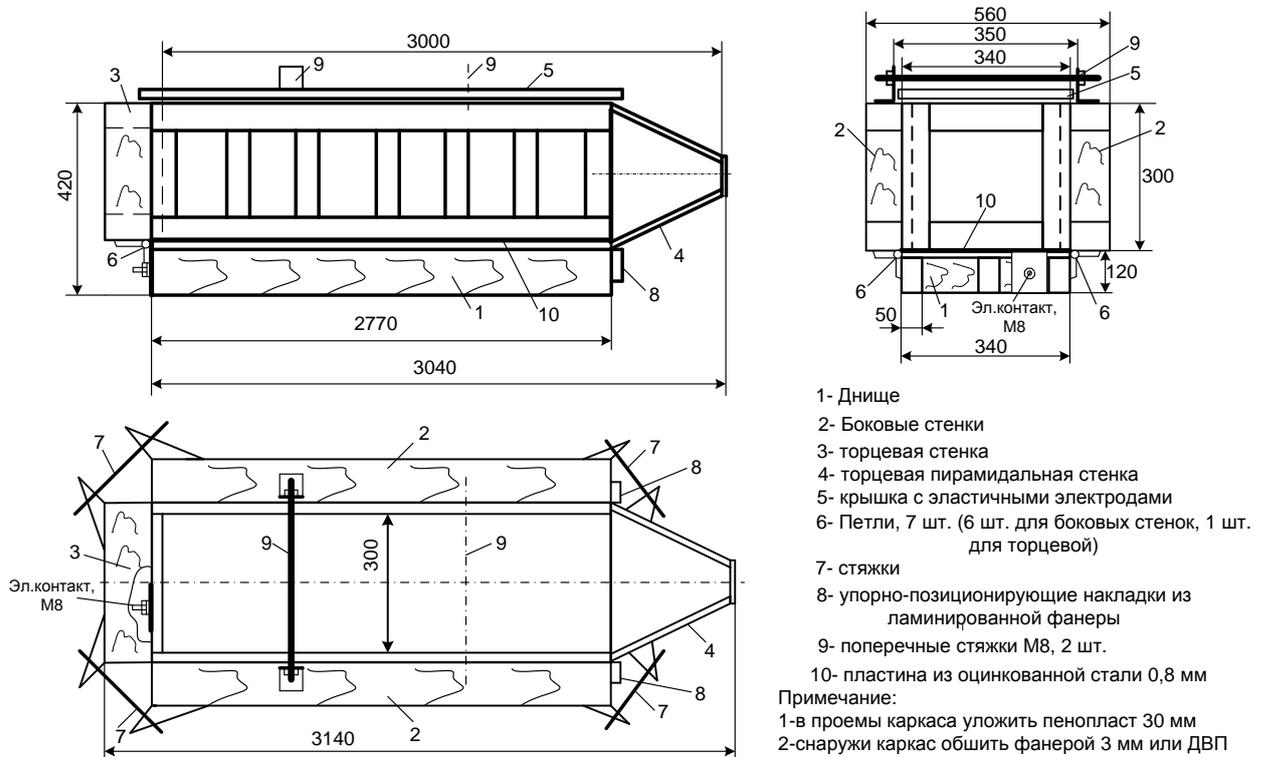


Рис. 4.7. Конструкция опалубки для изготовления железобетонных забивных свай сечением 300x300 мм длиной $l = 3$ м

Такая конструкция этого электрода необходима для того, чтобы ослабить негативное влияние пространственной арматуры сваи на процесс ЭТО электродным методом. При установке крышки на свое место после укладки в опалубку арматуры и бетонной смеси эластичные контакты приходят в соприкосновение с поверхностью бетона. Благодаря предложенной конструкции и размерам контактов расстояние от них до ближайших элементов арматуры получается сопоставимым с расстоянием до противоположного электрода (стальной пластины на поверхности днища). В результате этого при приложении электрического напряжения к электродам на арматуру будет ответвляться лишь незначительная часть электрического тока, а основная часть будет пронизывать

толщу бетона, обеспечивая объемное тепловыделение и достаточно однородный разогрев материала. Если вместо эластичных контактов применить электрод в виде стальной пластины, как в нижней части опалубки (т.е. на поверхности днища), то электрический ток будет концентрироваться в местах близкого взаимного расположения элементов арматуры и поверхности пластины. В этом случае основная часть электрического тока будет проходить через арматуру и небольшие участки объема бетона в поверхностных слоях изделия, вызывая перегрев и порчу материала на этих участках, а также отсутствие объемного тепловыделения и разогрева основной части материала. Другими словами, выполнить ЭТО в этом случае будет невозможно. Внешний вид опалубки для изготовления железобетонной сваи с применением ЭТО электродным методом, рассмотренной конструкции (рис. 4.7), представлен на рис. 4.8.



Рис. 4.8. Внешний вид опалубки для изготовления железобетонной сваи с ненапрягаемой арматурой сечением 300x300 мм длиной $l = 3$ м (ГОСТ 19804-2012) с применением ЭТО электродным методом

Как отмечено выше, такие изделия, как колодезные железобетонные кольца изготавливаются преимущественно с помощью безопалубочной технологии. Поэтому для изготовления таких изделий с применением ЭТО требуется не опалубка, а оснастка, которая позволяет, во-первых, накладывать на поверхность электроды, обеспечивая при этом качественный электрический контакт и не

вызывая повреждения еще не окрепшего изделия, во-вторых, создавать на его поверхности теплоизоляцию с требуемыми параметрами. Анализ результатов предварительных экспериментов [100,121] позволил сделать вывод, что для решения такой задачи удобно использовать легкую оснастку, снабженную эластичными электродами и теплоизоляцией, выполненной также из эластичного материала, например поролона.

Конструкция такой оснастки в поперечном сечении при установке на обрабатываемый объект представлена на рис. 4.9 вместе с электрической схемой подключения электродов к источнику питания через согласующие трансформаторы.

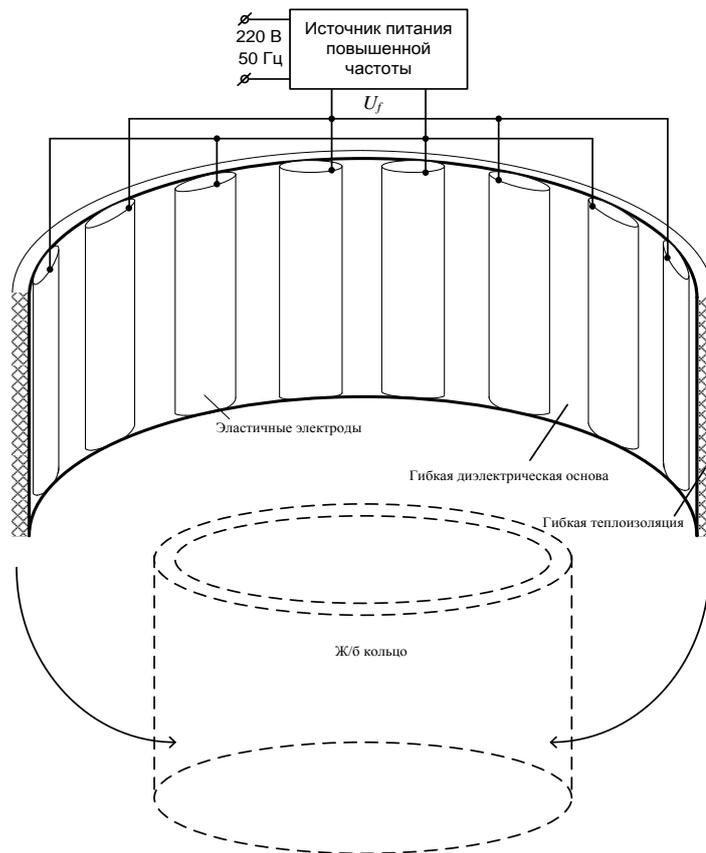


Рис. 4.9. Конструкция оснастки для ЭТО колодезных железобетонных колец

Как следует из рис. 4.9, на наружную поверхность изделия укладываются несколько эластичных электродов, а каждая пара соседних электродов подключается к разным выводам напряжения U_f повышенной частоты источника питания на основе транзисторного преобразователя напряжения, в соответствии

с представленной схемой подключения. Характерно, что при выполнении ЭТО электродным методом в прохождении электрического тока через обрабатываемое изделие принимает участие арматура, выполненная в виде плоской сетки, которая расположена коаксиально с внутренней и внешней поверхностью железобетонного кольца. Действительно, электрический ток, стекая с одного электрода, проходит через слой бетона и попадает на арматуру. Затем он в месте расположения второго электрода стекает с арматурной сетки и вновь, проходя слой бетона, попадает на этот электрод. Некоторая часть электрического тока замыкается через слой бетона в промежутке между соседними электродами, минуя арматурную сетку. Такая картина прохождения электрического тока наблюдается в каждой паре соседних электродов, к которым подключены выводы источника питания. В итоге обеспечивается достаточно равномерный электроразогрев изделия.

При установке на наружную поверхность изделия благодаря гибкой конструкции оснастки она равномерно обхватывает железобетонное кольцо, обеспечивая достаточно качественный электрический контакт эластичных электродов с поверхностью изделия в ходе ЭТО. Внешний вид изделия с установленным действующим макетом оснастки показан на рис. 4.10.



Рис. 4.10. Железобетонное колодезное кольцо типа КС 10.6 после формовки и установки оснастки для выполнения ЭТО

4.3. Разработка полупроводниковых источников питания опытно-промышленных установок для изготовления железобетонных изделий с применением ЭТО

Основой для разработки конструкции полупроводниковых (транзисторных) источников питания для опытно-промышленных установок стал опыт, полученный в ходе исследований, выполненных ранее как в лабораторных, так в производственных условиях [100], а также результаты теоретических исследований, представленных в гл. 3. На основании анализа и обобщения всех этих сведений было принято решение использовать во всех вариантах опытно-промышленного применения ЭТО источники питания, имеющие одно и то же схемотехническое решение при несколько отличном конструктивном выполнении.

На рис. 4.11 представлена электрическая схема источников питания для осуществления ЭТО, выполненных на основе транзисторного преобразователя напряжения. Источник питания имеет структуру, характерную для устройств такого типа и содержит блок низковольтного сетевого выпрямителя (поз. 1 – рис. 4.11), выполненный с использованием силовых диодов и тиристоров VD1 – VD4. Он подключен к питающей сети и служит для выпрямления сетевого напряжения 220/380 В 50 Гц с одновременным устранением пульсаций и регулировкой величины выпрямленного напряжения U_{ex} с помощью схемы управления тиристорами (поз. 9 – рис. 4.11) Это напряжение подается на высокочастотный преобразователь напряжения (поз. 2 – рис. 4.11), также выполненный с использованием полупроводниковых приборов – высоковольтных силовых транзисторов VT4-VT7 и собранный по схеме симметричного мостового транзисторного преобразователя напряжения [122]. Он обеспечивает преобразование энергии постоянного (выпрямленного) напряжения в энергию переменного напряжения U_f повышенной частоты (10–20 кГц), регулируемое по амплитуде в тех же пределах, что и U_{ex} . Напряжение повышенной частоты подводится к первичной обмотке силового (повышающего или понижающего)

трансформатора Т5 повышенной частоты (поз. 5 – рис. 4.11), а с выводов вторичной обмотки этого трансформатора напряжение подается непосредственно на обрабатываемое изделие ОИ (рис. 4.11). Задающий генератор (поз. 3 – рис. 4.11) служит для получения напряжения повышенной частоты, осциллограмма которого имеет практически прямоугольную форму. Управляющее напряжение через промежуточный трансформатор Т4 (поз. 4 – рис. 4.11) небольшой мощности подается на силовые транзисторы VT4-VT7, работающие в ключевом режиме, и обеспечивает их надежное и эффективное синхронизированное переключение из закрытого состояния в открытое и наоборот при работе преобразователя. Задающий генератор отличается малым потреблением электроэнергии, которое не превышает нескольких Вт.

В ходе экспериментальных исследований было изготовлено и использовалось несколько вариантов источника питания, выполненных по схеме, представленной на рис. 4.11. Они отличались, прежде всего, типом применяемых силовых диодов и тиристоров сетевого управляемого выпрямителя VD1 – VD4 (поз. 1 – рис. 4.11) и типом силовых высоковольтных транзисторов VT4÷VT7 преобразователя напряжения (поз. 2 – рис. 4.11). В частности, использовались мощные полевые транзисторы типа FQA11N90C, а также IGBT транзисторы типа IRG4PH50KD, IRG4PH50UDPBF, IRG4PSH71UDPBF, IRG7PH42UD и IRG7PH46UD. При этом номинальная мощность источника питания варьировалась от 1 кВт до 8 кВт. Такие параметры, как показывают результаты теоретических исследований (см. гл. 3), позволяют выполнять ЭТО всех заданных выше изделий. Поскольку трансформаторы Т2, Т3, Т4 в схеме источника питания работают на напряжении повышенной частоты, они были изготовлены с использованием ферритовых сердечников.

Для того, чтобы иметь возможность применять один и тот же источник питания для выполнения ЭТО различных железобетонных изделий, когда требуется иметь выходное напряжение различной величины при различных значениях электрического тока на выходе источника, был изготовлен набор сменных обмоток силового трансформатора Т5 (рис. 4.11).

Эти обмотки изготовлены с использованием проводов различного сечения, а вторичные обмотки содержат большое количество отпаек.

Расчет и конструирование источников питания производились по известным методикам [100, 122] с использованием в качестве исходных сведений результатов теоретических исследований (см. гл. 3). На рис. 4.12 представлен внешний вид источника питания мощностью 1 кВт, т.е. наименьшей мощности в линейке разработанных и изготовленных установок, который используется, в основном, для экспериментов в лабораторных условиях.

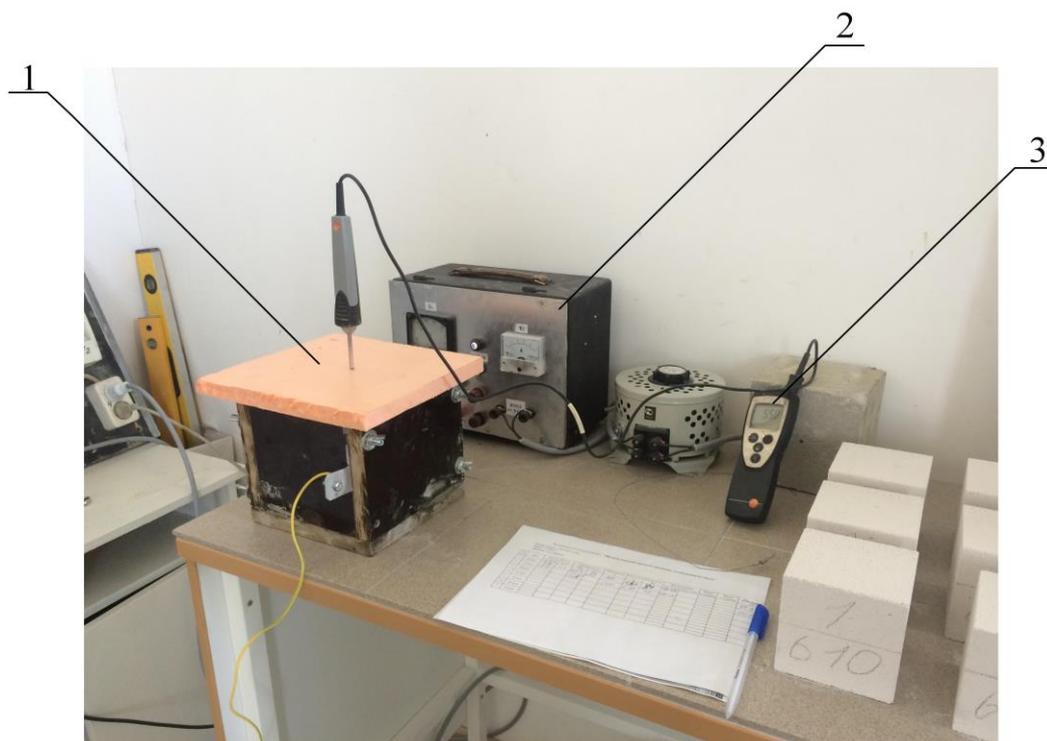
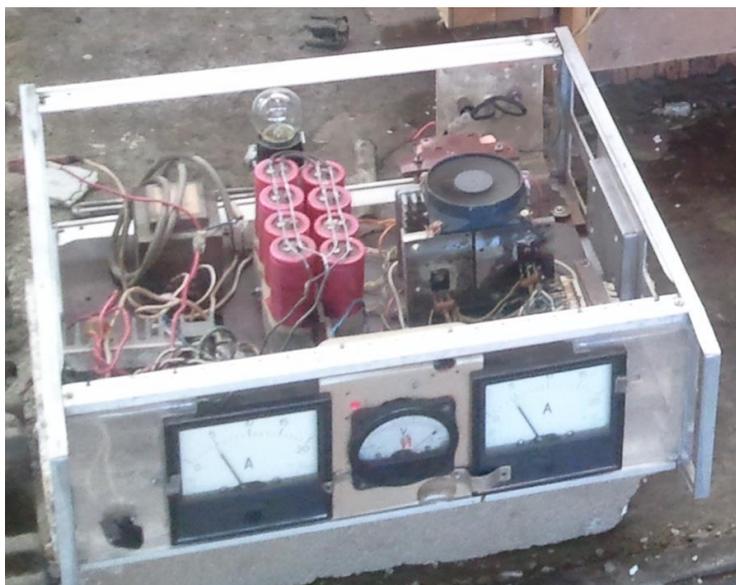


Рис. 4.12. Внешний вид источника питания на основе транзисторного преобразователя напряжения мощностью 1 кВт

Этот источник питания изготовлен с использованием мощных высоковольтных полевых транзисторов и имеет несколько большую частоту выходного напряжения (15-20 кГц).

На рис. 4.13 показаны источники питания разной мощности на основе полупроводникового преобразователя напряжения, в конструкции которого применены IGBT транзисторы с частотой выходного напряжения 10÷14 кГц. Эти

источники питания использовались в экспериментах в производственных условиях на опытно-промышленных установках.



а)



б)

Рис. 4.13. Источники питания на основе полупроводникового преобразователя напряжения с использованием IGBT транзисторов: а) – мощностью 4 кВт; б) – мощностью 7 кВт

Независимо от типа применяемых транзисторов, мощности и конструкции транзисторного преобразователя осциллограмма выходного напряжения источника питания U_f имеет прямоугольную и практически идеально симметричную относительно нулевого значения осциллограмму напряжения. Это позволяет избежать возникновения электролиза в бетонной смеси и её порчи по этой причине при протекании тока повышенной частоты в толще бетона в случае

использования электродного метода электротепловой обработки. Характерные осциллограммы выходного напряжения источника питания такого типа при режиме работы близком к режиму холостого хода, т.е. фактически осциллограммы электродвижущей силы (ЭДС), представлены на рис. 4.14.

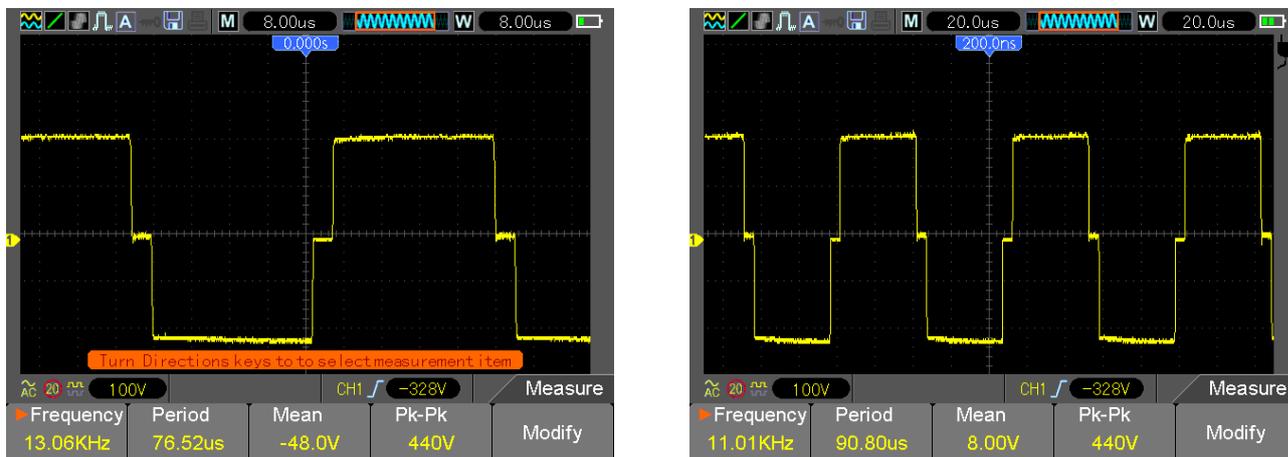


Рис. 4.14. Характерные осциллограммы выходного напряжения (ЭДС) источника питания на основе транзисторного преобразователя напряжения

Как было установлено предшествующими исследованиями [100, 111], важным преимуществом ЭТО электродным методом с помощью напряжений и токов повышенной частоты, имеющих такой характер изменения во времени (рис. 4.14), является заметная активация твердения бетона и достижение им более высокой механической прочности по сравнению с обработкой токами промышленной частоты 50 Гц. Недостатком переменного напряжения, имеющего такую осциллограмму (рис. 4.14), являются трудности точного расчета режимных параметров электрических цепей (величина токов, напряжений, мощности в различных точках схемы) с полупроводниковым источником питания. Существующие методы расчета, основанные на использовании теории комплексных чисел и широко применяемые для установок промышленной частоты 50 Гц, пригодны только в том случае, когда токи и напряжения изменяются во времени по синусоидальному закону. Однако, как показали выполненные исследования, эффективным инструментом электрического расчета установившихся режимов работы цепей с полупроводниковыми преобразователями напряжения являются расчетные методики, базирующиеся на применении частотного анализа с использованием разложения Фурье [123].

4.4. Методика проведения экспериментов на опытно-промышленных установках для изготовления железобетонных изделий с применением ЭТО

При выполнении экспериментов на опытно-промышленных установках, в которых изделия изготавливаются с применением опалубки (рис. 4.3, 4.5, 4.8), опалубка устанавливалась на прочной, ровную поверхность и приводилась в рабочее положение, проверялось состояние всех креплений и соединений. Затем производилась подготовка ее внутренней поверхности к укладке бетона посредством нанесения смазки для уменьшения адгезии материала к бетону в целях облегчения распалубки после завершения изготовления изделия. Производилось подключение проводников, идущих с выхода источника питания, к электродам опалубки. После этого в опалубку укладывались арматура и бетон с одновременным уплотнением бетона с помощью глубинного уплотнителя (рис. 4.15).

Сразу же после укладки и утрамбовки бетона в опалубке, но до начала ЭТО в толщу свежего бетона заглабливались гибкие трубки из электроизоляционного материала, запаянные с одной стороны, в которые затем вводилась термопара для измерения температуры в требуемых точках объема материала.

Кроме этого, в некоторых экспериментах в толще материала устанавливался зонд для измерения напряженности электрического поля токов проводимости в бетоне. Этот зонд содержит два электрода в виде отрезков медного луженого провода диаметром 1,5 мм и длиной 7 см, которые заглабливались в свежий бетон параллельно друг другу и перпендикулярно направлению электрического тока на расстоянии $\Delta S = 6$ см друг от друга. От каждого электрода такого зонда сделаны отводы изолированным проводом для подключения измерительных приборов. Применение таких зондов позволяет выполнить оценку напряженности электрического поля в ходе ЭТО в различных точках объема материала для проверки однородности объемного тепловыделения в соответствии с соотношением (2.1). Действительно, при установке зонда его электроды имеют хороший электрический контакт со средой (т.е. с бетоном) и при протекании в ней

электрического тока приобретают электрический потенциал, соответствующий месту расположения электродов зонда.



а)



б)

Рис. 4.15 Укладка свежего бетона в опалубку для изготовления фундаментных блоков (а) (рис. 4.3) и железобетонных перемычек (б) (рис. 4.5)

Между электродами возникает разность потенциалов ΔU , которую можно измерить, например, с помощью осциллографа, что позволяет оценить напряженность электрического поля в месте установки зонда по формуле

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta S}. \quad (4.1)$$

При использовании опалубки для изготовления забивной сваи (рис. 4.8) после укладки и уплотнения бетона на изделие сверху укладывались эластичные электроды и полиэтиленовая пленка для устранения теплопотерь бетоном в ходе ЭТО, на которые затем накладывалась крышка опалубки. Вес этой крышки обеспечивает хороший электрический контакт электродов с поверхностью бетона без повреждения этой поверхности. В остальных вариантах (рис. 4.3 и 4.5) после укладки и уплотнения бетона на его поверхности также размещалась

полиэтиленовая пленка. В завершение подготовительных операций в верхней части опалубки устанавливалась теплоизоляция в виде листов пенопласта толщиной 3 – 8 см.

При изготовлении колодезных железобетонных колец на поверхность только что отформованного изделия аккуратно устанавливалась оснастка для проведения ЭТО (рис. 4.10). Благодаря применению в конструкции оснастки эластичных электродов обеспечивается их качественный электрический контакт с поверхностью изделия. После этого производилось подключение к оснастке проводников, идущих от источника питания.

После выполнения всех описанных выше операций на электроды подавалось напряжение от источника питания, и выполнялась электротепловая обработка посредством пропускания электрического тока повышенной частоты в толще бетона, т.е. электродным методом.

В ходе испытания периодически выполнялось измерение температуры с помощью термопары прибором типа ДТ 9207А в различных точках объекта обработки согласно рис. 4.16, а также регистрировались электрические параметры электротепловой обработки: напряжение $U_{ex} = U_{=}$, ток $I_{ex} = I_{=}$ в звене постоянного тока (рис. 4.11), амплитудные значения напряжения повышенной частоты на нагрузке U_H , по осциллограммам вида рис. 4.14 при подключении осциллографа к электродам опалубки (оснастки). Далее рассчитывалась мощность, передаваемая в нагрузку (объект обработки) через транзисторный преобразователь напряжения [100]:

$$P = U_{=} \cdot I_{=} = U_{ex} \cdot I_{ex} \quad . \quad (4.2)$$

Не следует забывать, что к самому объекту обработки прикладывается мощность несколько меньшей величины [100]:

$$P_H = P \cdot \eta_{\Pi} \quad , \quad (4.3)$$

где η_{Π} – КПД преобразователя и силового трансформатора Т5 (рис. 4.11).

Как показали исследования характеристик использованных источников питания, этот показатель имеет достаточно высокие значения и колеблется в пределах $\eta_{\pi}=0,985\div 0,995$ [127].

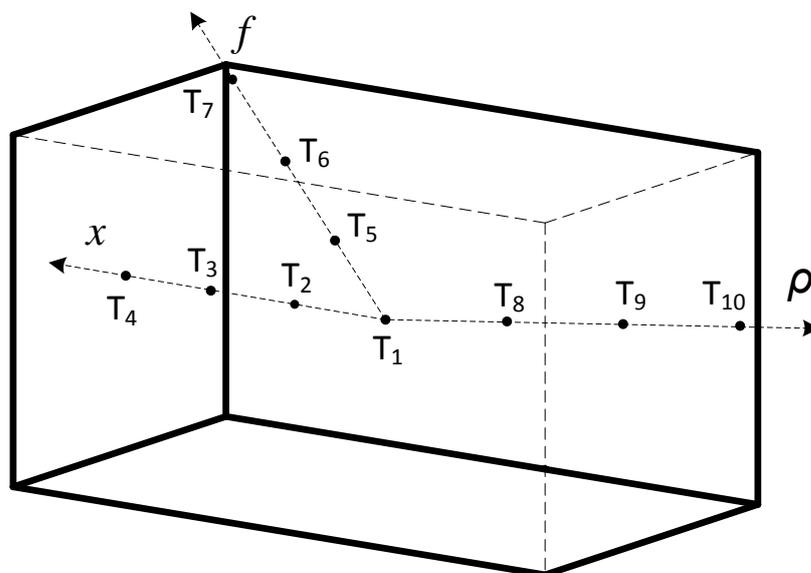


Рис. 4.16 Точки для измерения температуры в объеме изделия в процессе ЭТО: T_1 – температура в центре изделия; $T_2 - T_{10}$ – температура в других точках

Для вычислений по формуле (4.3) целесообразно принять усредненное значение $\eta_{\pi} = 0,99$, учитывая бурный прогресс в сфере силовой полупроводниковой техники, сопровождающийся значительным повышением показателей ее энергетической эффективности.

Знание P_H при наличии измеренного значения U_H позволяет определить амплитуду электрического тока, протекающего через объект обработки [100]:

$$I_H = \frac{P_H}{U_H} , \quad (4.4)$$

а также величину электрического сопротивления обрабатываемого изделия:

$$R_H = \frac{U_H}{I_H} . \quad (4.5)$$

Кроме этого, можно оценить величину удельного электрического сопротивления бетона [100]:

$$r_V = \frac{R_H S}{d} , \quad (4.6)$$

где S – площадь электродов; d – расстояние между электродами.

При использовании ЭТО в производственных условиях практическое значение имеет не только знание мощности P (4.2), но величины использованной электроэнергии, т.к. именно по этому параметру предприятие расплачивается за потребляемые энергоресурсы. В процессе ЭТО мощность в силу разных причин может колебаться в небольших пределах, поэтому для определения значения использованной при выполнении ЭТО электроэнергии, кВтч, необходимо пользоваться формулой [100]

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \tau_i}{3.6 \cdot 10^6}, \quad (4.7)$$

где P_i – мощность, Вт и τ_i – продолжительность, с, периода времени, соответствующего неизменного значения мощности.

В действительности потребляемые из питающей сети мощность P_C и электроэнергия W_C будут иметь несколько большую величину согласно выражениям [100]

$$P_C = \frac{P}{\eta_B}; W_C = \frac{W}{\eta_B}, \quad (4.8)$$

где $\eta_B < 1$ – КПД управляемого выпрямителя сетевого напряжения $VD1 \div VD4$ (рис. 4.11), который может колебаться в достаточно широких пределах в зависимости от конструктивного выполнения и применяемых силовых электронных компонентов. Поэтому при исследовании процессов ЭТО удобнее пользоваться значениями P (4.2) и W (4.7), т.к. эти параметры практически полностью определяются условиями технологического процесса и почти не зависят от характеристик источника питания.

Следует отметить, что в одном эксперименте достоверно выполнить измерение температуры во всех точках, отмеченных на рис. 4.16, весьма затруднительно. Одно измерение может занимать по времени до 1 мин и к моменту завершения измерений температура в последней точке (рис. 4.16) может уже заметно отличаться от того значения, которое было в момент начала измерений. Поэтому в

эксперименте с одним изделием количество точек для измерения температуры составляло 4 – 5 шт. Например, в одном опыте измерения проводились в точках на оси x , во втором – на оси f , в третьем на оси ρ и т.д.

Предельная температура разогрева изделия в процессе ЭТО не превышала 50-60 °С, а время разогрева имело, как правило, величину не менее 3 ч. согласно рекомендациям, высказанным в [100], а также результатам теоретических исследований (гл. 3).

4.5. Выводы по гл. 4

1) Как ожидалось, существующая методология создания и применения процессов ЭТО токами повышенной частоты при изготовлении железобетонных изделий в сочетании предложенными в настоящей работе методиками расчета характеристик стационарного температурного поля показали себя как эффективный инструмент решения задач практического применения ЭТО; результаты теоретических исследований, выполненных методами компьютерного моделирования (гл. 3) позволили сразу же осуществить разработку и изготовление оборудования, пригодного для промышленного применения без промежуточных экспериментальных разработок и исследований.

2) В конструкции опытно-промышленных установок применены достаточно распространенные и сравнительно недорогие материалы и компоненты, хорошо зарекомендовавшие себя в строительной отрасли и в сфере электротехники; это дает основание рассчитывать на экономический эффект от применения ЭТО токами повышенной частоты на практике.

3) Оборудование имеет относительно простую конструкцию и схемотехнические решения, его изготовление не требует какой-либо сложной и дорогостоящей оснастки, применения специальной технологии и не требует от работников какой-либо специальной подготовки и высокой квалификации; производство такого оборудования может быть налажено в условиях рядовой

столярно-слесарной мастерской и обычной электротехнической лаборатории с привлечением сотрудников средней квалификации.

4) Использование в конструкции опалубки неметаллических материалов позволяет снизить бесполезные затраты энергии, идущие на разогрев опалубки в ходе тепловой обработки железобетонных изделий, как это имеет место при применении традиционных методов тепловой обработки, когда для изготовлений железобетонных изделий используется стальная опалубка; кроме этого, существенно снижается вес опалубки, что существенно облегчает транспортировку и перемещение опалубки в процессе эксплуатации, а также распалубку готовых изделий.

5) Предложенный набор железобетонных изделий для опытно-промышленной апробации ЭТО токами повышенной частоты входит каталоги продукции практически каждого предприятия сборного железобетона, поэтому успешная реализация этого опытно-промышленного применения ЭТО позволяет рассчитывать на большой спрос такую технологию, как Российской Федерации, так и за рубежом.

Глава 5. Результаты исследования процесса электротепловой обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты на опытно-промышленных установках

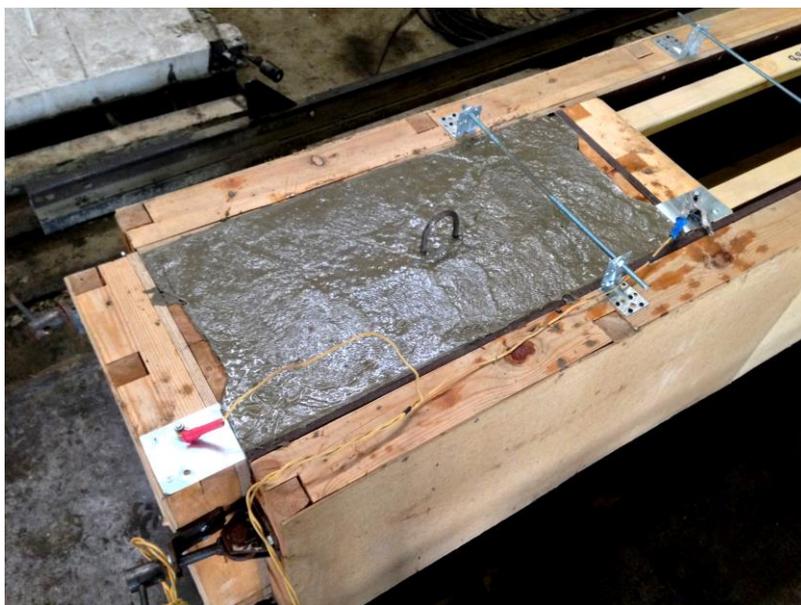
Разработка и изготовление опытно-промышленных установок, описанных в гл. 4, позволили выполнить экспериментальные исследования процесса электротепловой обработки применительно к изготовлению реальных и распространенных изделий. Это позволяет оценить с различных точек зрения возможность и целесообразность широкого применения на практике ЭТО железобетонных изделий токами повышенной частоты, а также выполнить проверку как общей методологии (гл. 1, рис. 1.1) создания и применения процессов ЭТО токами повышенной частоты, так и расчетных методик представленных в настоящей работе (гл. 2), являющихся частью общей методологии.

5.1. Порядок проведения экспериментальных исследований опытно-промышленных установок

Экспериментальные исследования процесса ЭТО с использованием разработанных опытно-промышленных установок, описанных в гл.4, проводились в производственных условиях, в одном из цехов крупного предприятия сборного железобетона. Опалубки или железобетонные изделия (в случае применения безопалубочной технологии) в ходе экспериментов устанавливались на ровную, чистую поверхность (пол, платформа вибростенда) вблизи розеток цеховой сети напряжением 220 В для подключения источника питания повышенной частоты. Источник питания располагался, как правило, рядом с объектом обработки, чтобы обеспечить удобное подключения его выхода с напряжением повышенной частоты к электродам опалубки (оснастки).

Эксперименты проводились согласно методике, представленной в разд. 4.4, результаты опытов оформлялись в виде электронных таблиц в среде Microsoft Office Excel. Это позволило существенно ускорить и упростить обработку, анализ, обобщение, сравнение и оформление результатов эксперимента.

На рис. 5.1 показан внешний вид опалубки после укладки и уплотнения бетона при изготовлении фундаментных блоков с применением ЭТО токами повышенной частоты.



а)



б)

Рис. 5.1. Внешний вид опалубки после укладки и уплотнения бетона при изготовлении фундаментных блоков типа ФБС 9.4.6 (а) и ФБС 12.4.6 (б)

На рис. 5.2 представлен вид этой опалубки в ходе ЭТО: в начальный момент и в последующее время, когда поверхность бетона уже покрыта полиэтиленовой пленкой для устранения потери влаги, а поверх пленки установлена теплоизоляция (пенопласт).



а)



б)

Рис. 5.2. Внешний вид опалубки в процессе ЭТО при изготовлении фундаментных блоков типа ФБС 12.4.6: а – в начальный момент; б – в последующее время

После завершения ЭТО и снижения температуры изделия до безопасного значения (разность температуры изделия и окружающей среды не должна превышать 20 °С [1]) производилась распалубка изделия (рис. 5.3). Характерно, что процедура распалубки занимает не более 2÷3 мин и без особых усилий выполняется одним человеком благодаря небольшой массе элементов опалубки.



а)



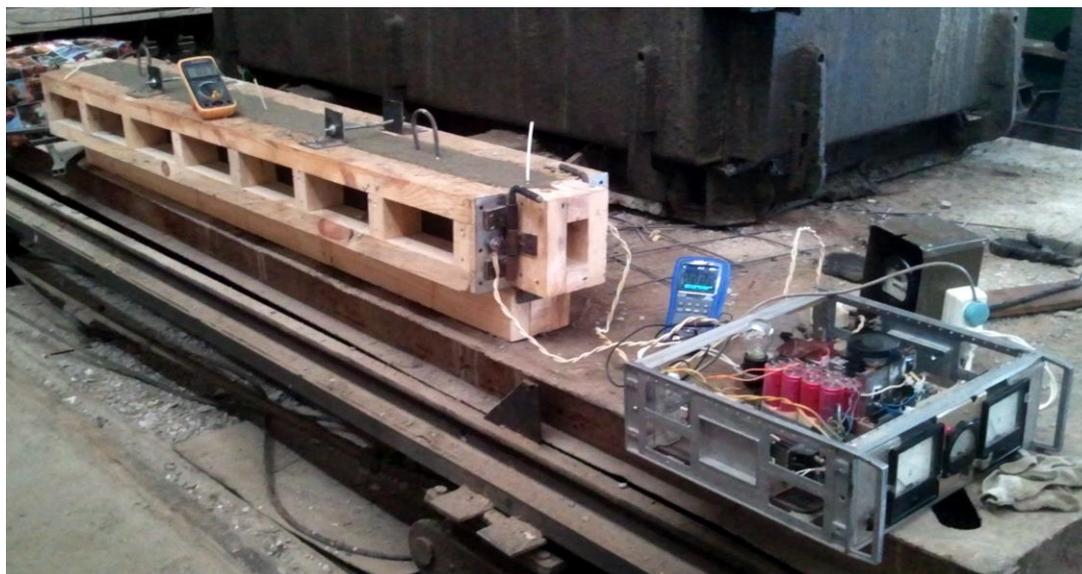
б)

Рис. 5.3. Внешний вид готовых изделий – фундаментных блоков типа ФБС 9.4.6 (а) и ФБС 12.4.6 (б) после распалубки

Такой же порядок действий применялся и при изготовлении с использованием ЭТО других железобетонных изделий. На рис. 5.4 представлен внешний вид опалубки после укладки и уплотнения бетона и в ходе ЭТО при изготовлении железобетонной перемычки типа 9ПБ21-8-п. Внешний вид готового изделия после распалубки показан на рис. 5.5

В ходе экспериментальных исследований был также выполнен опыт по электротепловой обработке железобетонного колодезного кольца. Такие изделия

изготавливаются по безопалубочной технологии, и ЭТО выполняется с применением эластичных электродов (разд. 4.2).



а)



б)

Рис. 5.4. Внешний вид установки при изготовлении железобетонной перемычки с применением ЭТО: а – после укладки и уплотнения бетона и в начальный момент ЭТО; б – в процессе ЭТО, когда поверхность бетона укрыта полиэтиленовой пленкой и пенопластом, а в проемах опалубки теплоизоляция отсутствует

На рис. 5.6 представлены стадии изготовления такого изделия с применением ЭТО. Характерно, что при изготовлении железобетонного кольца теплоизоляцией (пенопластом) была укрыта только его верхняя часть (рис. 5.6,а), на боковой

поверхности функцию теплоизоляции выполняют эластичные электроды, т.к. они изготовлены с применением поролона толщиной $15\div 20$ мм (рис. 5.6,б), обладающего низкой теплопроводностью.

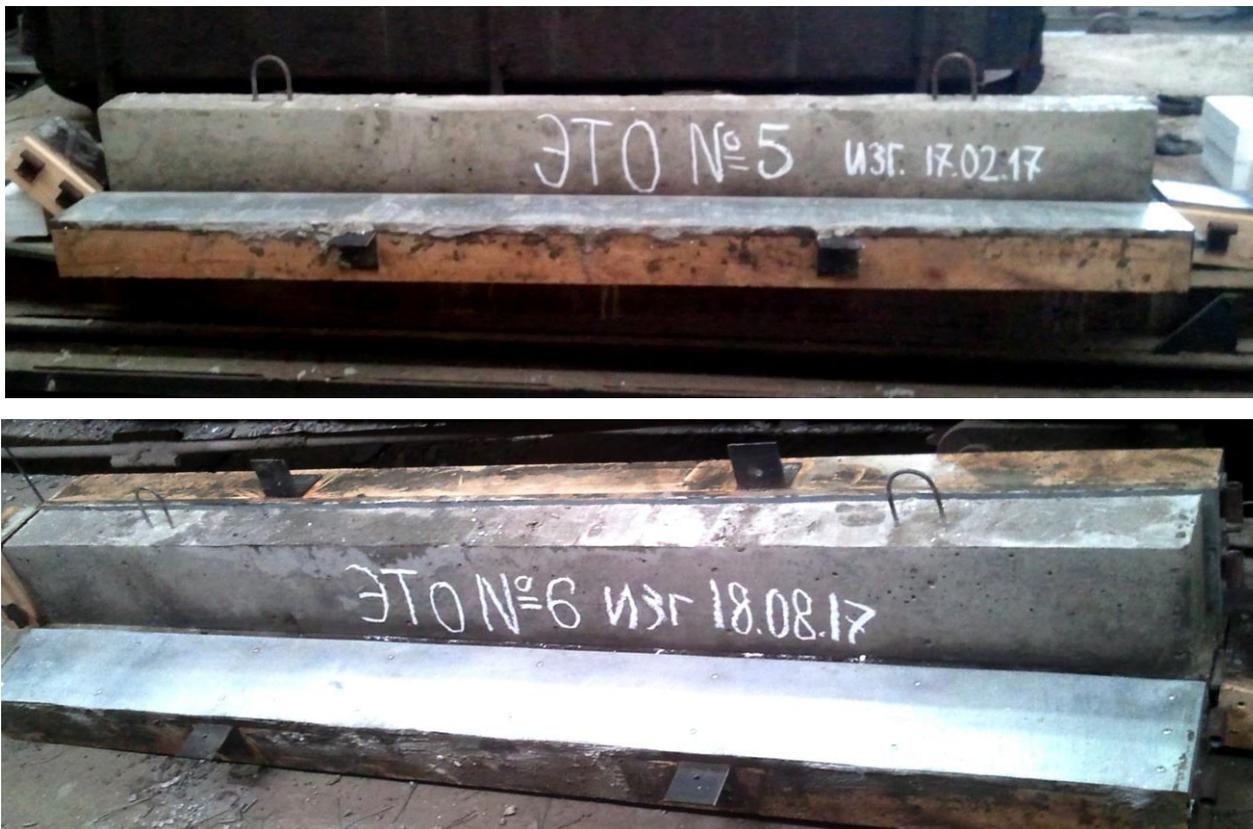


Рис. 5.5 Железобетонные перемычки типа 9ПБ21-8-п, изготовленная с применением ЭТО токами повышенной частоты

Как видно из представленного материала, в ходе всех экспериментов выполнялось осциллографирование и измерение напряжения повышенной частоты, приложенное к объекту, к электродам опалубки или оснастки. Характерные осциллограммы этого напряжения приведены на рис. 5.7.

Из рис. 5.7 видно, что качественно осциллограммы, полученные для различных изделий, имеют приблизительно одинаковый вид и заметно отличаются от осциллограммы ЭДС источника питания (рис. 4.14): они имеют более сглаженную форму вследствие влияния паразитных индуктивностей и емкостей силового трансформатора повышенной частоты Т5 (рис. 4.11) [100].



а)



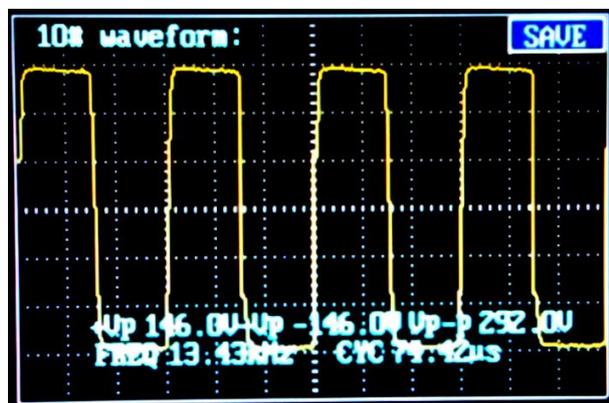
б)



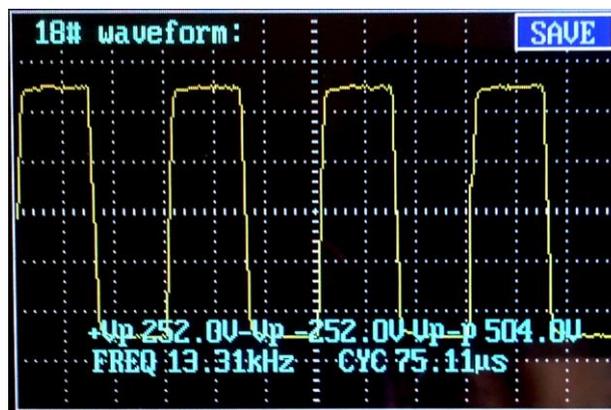
в)

Рис. 5.6. Изготовление железобетонного колодезного кольца по безопалубочной технологии с применением ЭТО: а – внешний вид установки в ходе ЭТО; б – демонтаж системы эластичных электродов после завершения ЭТО и охлаждения изделия; в – внешний вид готового изделия

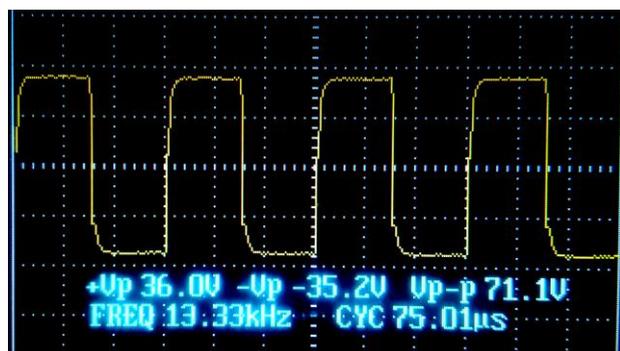
Другой важной особенностью приведенных осциллограмм является существенное различие в величине амплитуды воздействующего напряжения, которая в каждом случае определяется величиной электрического сопротивления объекта обработки и необходимой электрической мощностью, подводимой к объекту от источника питания.



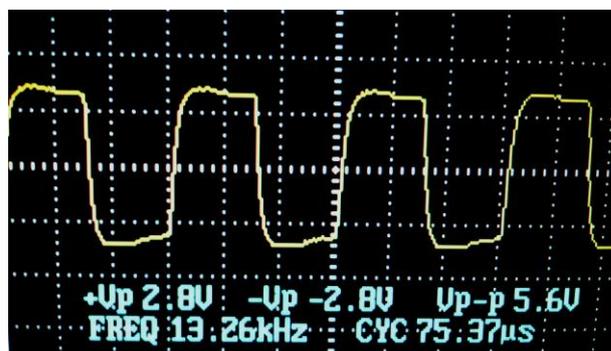
а)



б)



в)



г)

Рис. 5.7. Характерные осциллограммы напряжения на электродах опалубки (оснастки) при выполнении ЭТО электродным методом различных изделий: а – фундаментный блок типа ФБС 9.4.6; б – фундаментный блок типа ФБС 12.4.6; в – железобетонная перемычка типа 9ПБ21-8-п; г – железобетонное колодезное кольцо

При этом величина напряжения может колебаться в весьма широких пределах. Например, от 2,8 В при выполнении ЭТО железобетонного кольца (рис. 5.7,г) до 252 В (рис. 5.7,б) при обработке фундаментного блока типа ФБС 12.4.6 (т.е. почти в 100 раз). В этой ситуации, как нельзя лучше, демонстрируют свое преимущество источники питания на основе полупроводниковых (транзисторных) преобразователей напряжения. Во всех экспериментах можно использовать один

и тот же источник, а изменение величины напряжения достигается либо изменением отпаяк вторичной обмотки, либо посредством применения обмотки силового трансформатора повышенной частоты с требуемыми обмоточными данными из стандартного набора обмоток. Благодаря простой конструкции этого трансформатора и его небольшим размерам замена обмотки выполняется просто и быстро (8-10 мин). Это означает, что рабочий пост для изготовления железобетонных изделий с применением ЭТО токами повышенной частоты будет обладать высокой универсальностью, т.к. может быстро перестраиваться с изготовления изделий одного вида на изделия другого вида.

Обязательной процедурой при проведении исследований на опытно-промышленных установках является периодическое измерение предела прочности бетона на сжатие неразрушающим методом, как показано на рис. 5.8, после распалубки готового изделия.



Рис. 5.8. Измерение предела прочности бетона на сжатие неразрушающим методом с помощью прибора ИПС – МГ 4.01

5.2. Исследование временных характеристик процесса ЭТО при изготовлении железобетонных изделий на опытно-промышленных установках

При выполнении ЭТО, как следует из результатов теоретических исследований (см. разд. 3.5), значительное влияние на результаты тепловой обработки оказывает скорость и характер изменения (повышения) температуры материала. Эти показатели, в свою очередь определяются величиной и изменением во времени подводимой к изделию электрической мощностью, которые сопровождаются изменением значений электрических напряжений и тока в цепи обрабатываемого изделия в ходе ЭТО, а также величины электрического сопротивления изделия.

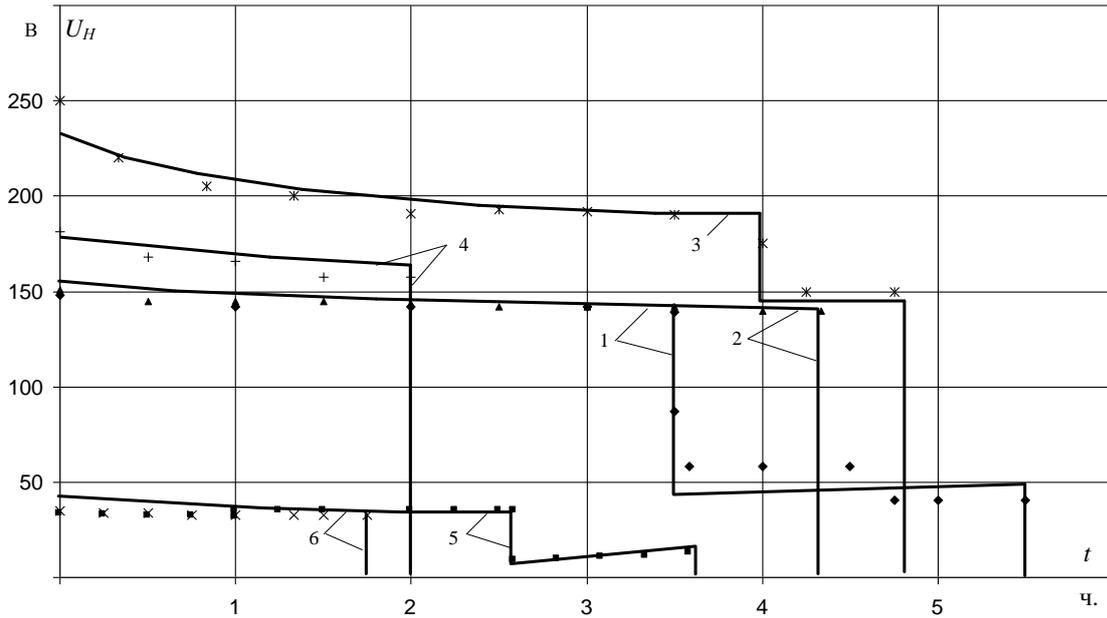
На рис. 5.9 представлены зависимости величины электрического напряжения U_H и электрического тока I_H (см. разд. 4.4) в цепи обрабатываемых изделий согласно табл. 5.1 от времени в ходе ЭТО, а рис. 5.10 представлены соответствующие им зависимости для электрической мощности (4.2).

Параметры экспериментов

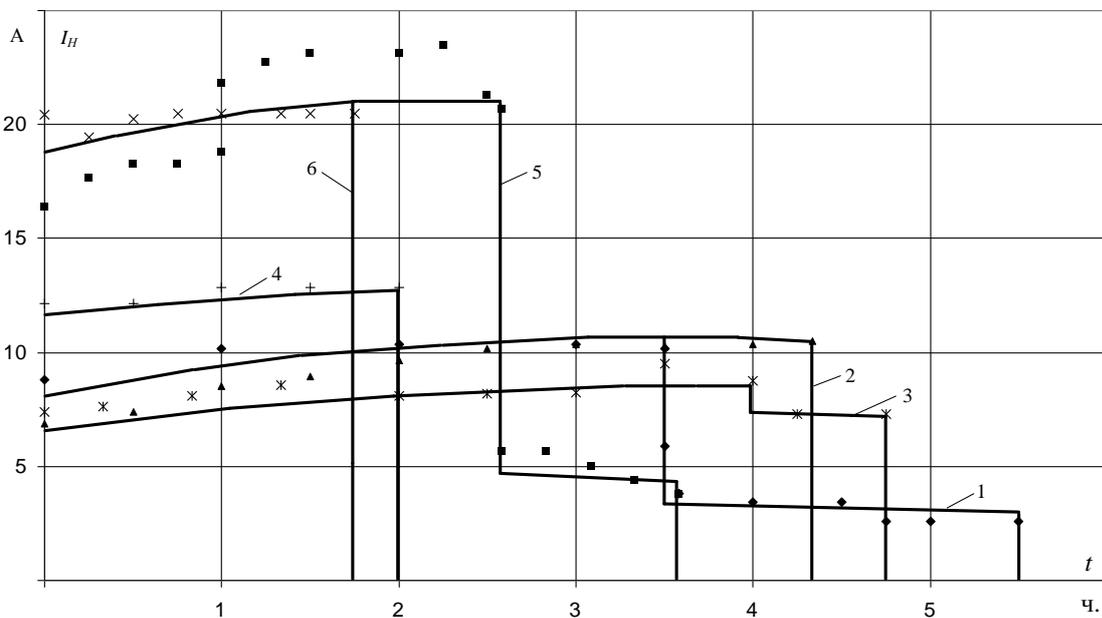
Таблица 5.1

№ объекта	Тип объекта	Условия ЭТО					Модуль поверхности $M_{II}, м^{-1}$
		Температура, °С			Длительность стадии нагревания, $\Delta t_{нагр}, ч.$	Длительность изотермической стадии, $\Delta t_{изот}, ч.$	
		Начальная (бетона), T_H	Окружающего воздуха, T_0	Изотермической стадии, $T_{изот}$			
1	ФБС9.4.6-Т	22	23,5	60	3,5	2	10,7
2	ФБС9.4.6-Т	9	17	50	4,3	0,7	10,7
3	ФБС 12.4.6-Т	9	13	50	4,75	0	10,14
4	ФБС 12.4.6-Т	23	18,7	40	2	0	10,14
5	9ПБ21-8-п	3	7,5	40	2,58	1	28,16
6	9ПБ21-8-п	19,5	24,7	40	1,75	0	28,16
7	Ж/б кольцо	15	17	40	3,25	0	28,42

Примечание: скорость охлаждения после завершения ЭТО во всех опытах не превышала 0,5 °С/ч.



а)



б)

Рис. 5.9. Зависимости электрического напряжения (а) и электрического тока (б) в цепи обрабатываемых изделий: резкое изменение величины в меньшую сторону – момент окончания стадии нагревания с последующей стадией изотермической выдержки (1.3.5); изменение до нуля – окончание ЭТО; в опытах 2,4,6 ЭТО завершается одновременно с окончанием стадии нагревания и далее следует термосная выдержка; точки – эксперимент, линии расчет по методике [100,119]

Как следует из представленных зависимостей, даже для одинаковых изделий наблюдается некоторые различия в этих зависимостях: по величине рассматриваемых параметров, по длительности передачи электроэнергии, по характеру изменения во времени. Причиной этих различий являются отличия в

величине температуры окружающего воздуха (иногда весьма существенные), длительности стадии нагревания, в величине подаваемой мощности, скорости нагрева изделия, рецептуре бетона и др.

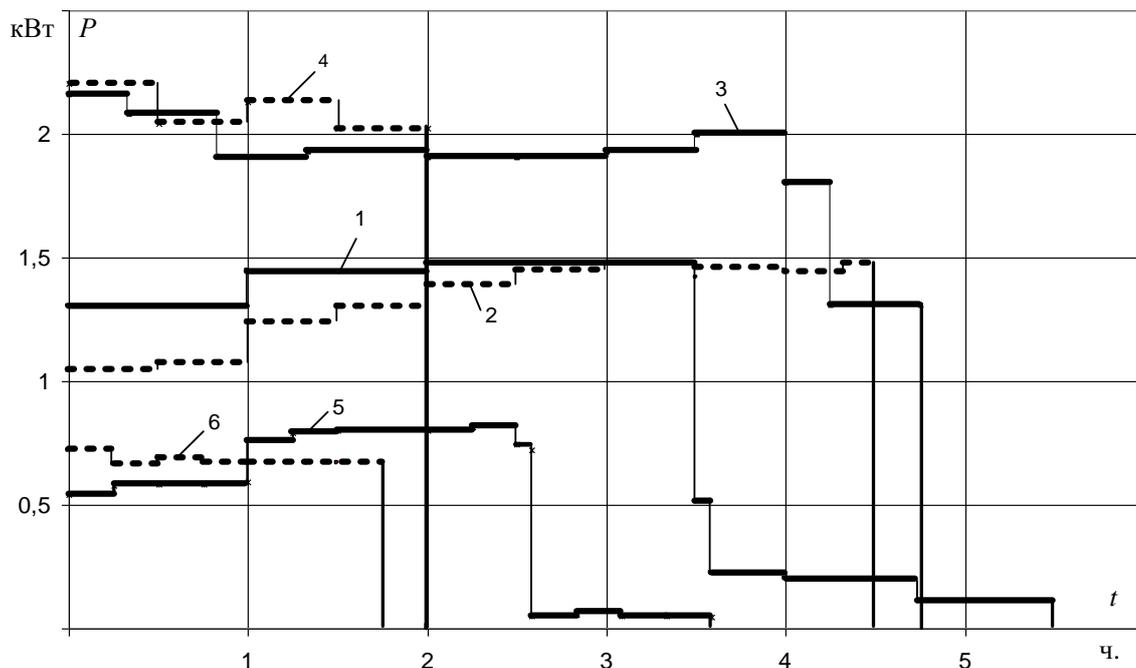


Рис. 5.10. Зависимости электрической мощности, подводимой к объекту через источник питания: нумерация зависимостей согласно табл. 5.1

На основании этих результатов (рис. 5.9 и 5.10) и использованием соотношения (4.5) получены зависимости электрического сопротивления обрабатываемых изделий от времени обработки, которые приведены на рис. 5.11. Эти зависимости, имеющие вид кривых с точкой минимума, качественно согласуются с ранее полученными результатами [1,100]. При этом наблюдаются существенные отличия абсолютных значений электрического сопротивления различных изделий, что и влечет за собой различия в величине электрических напряжений и тока в нагрузке (рис. 5.7). Учитывая, что измерение этих электрических параметров в цепи повышенной частоты выполнялось с помощью осциллографа и имеет погрешность не ниже 10 % , а также возможные отклонения в рецептуре бетона, согласование результатов эксперимента и расчета (рис. 5.11) можно считать вполне приемлемым.

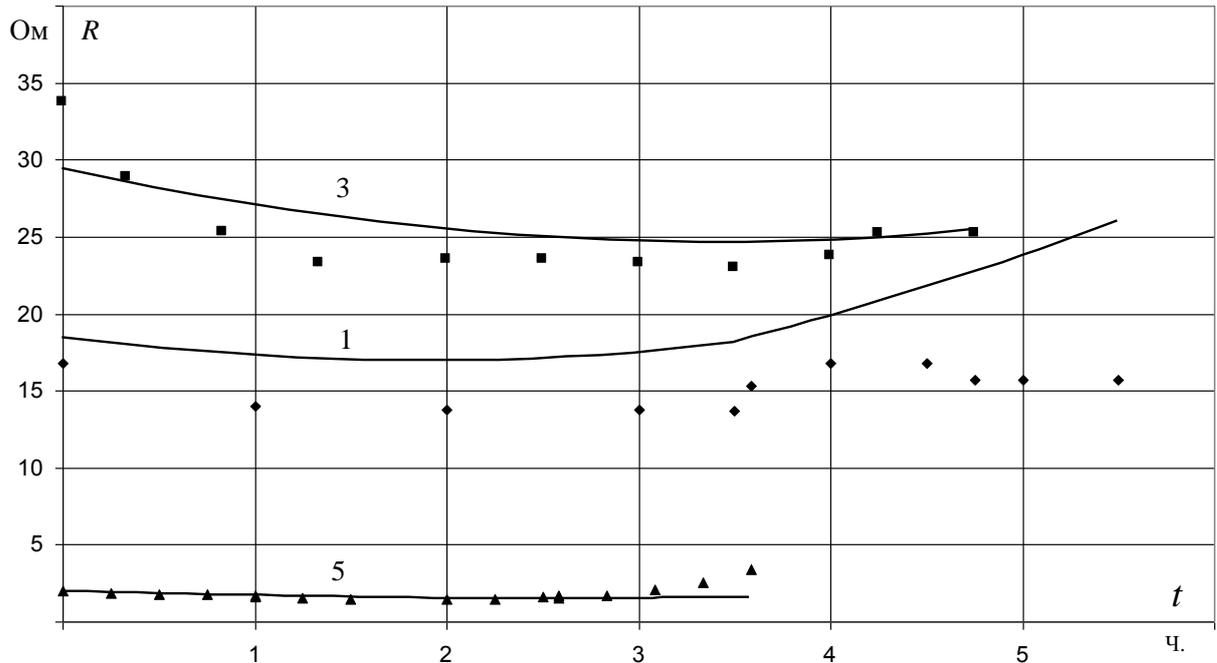
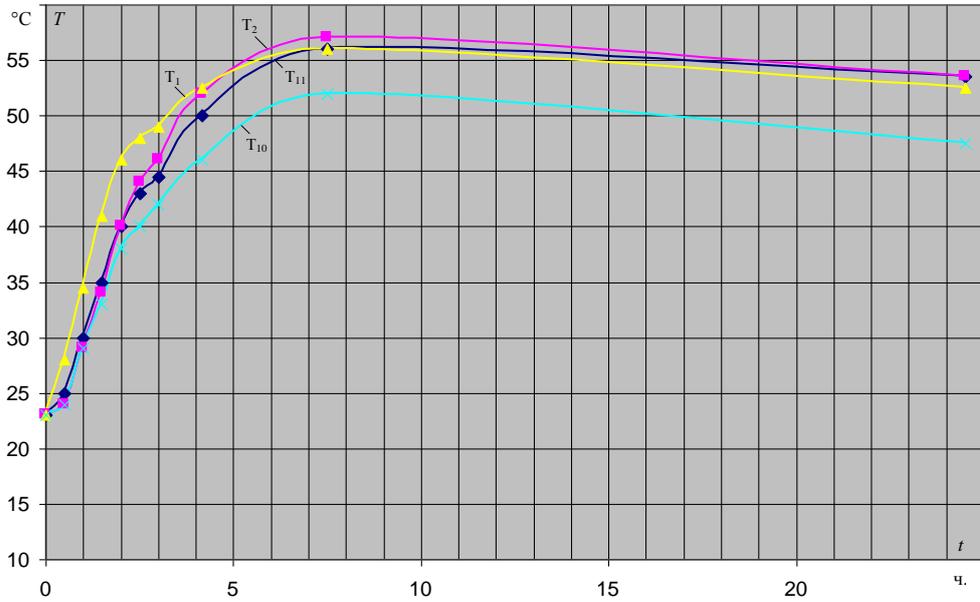


Рис. 5.11. Зависимости электрического сопротивления обрабатываемых изделий от времени обработки: точки – эксперимент; линии – расчет по методике [91,100]

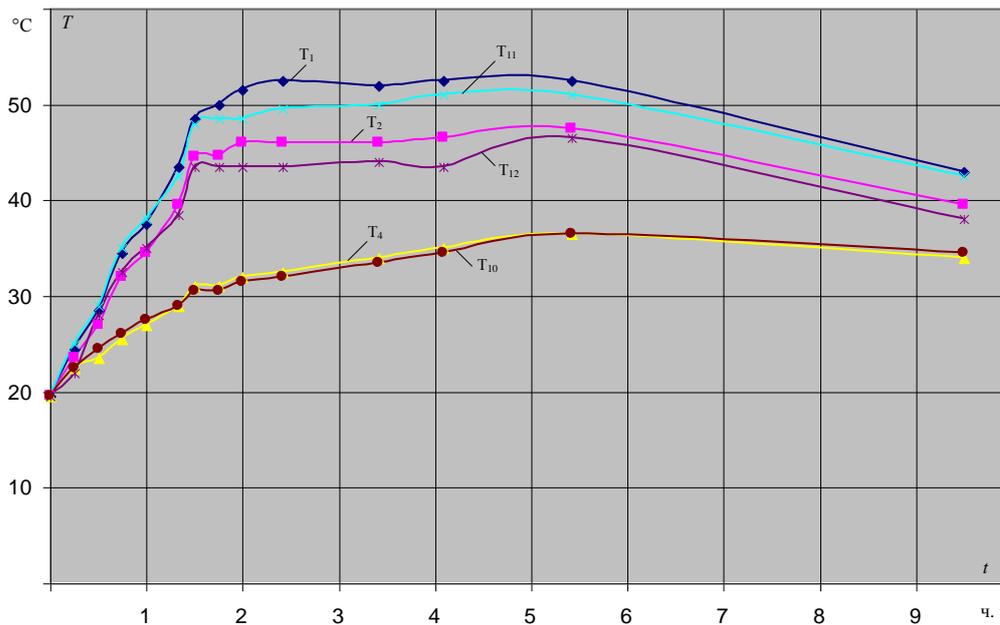
Вполне очевидно, что наиболее важными зависимостями являются характеристики изменения температуры материала во времени. Поскольку измерения температуры производились в нескольких точках (см. рис. 4.16), невозможно представление всех зависимостей, полученных в опытах, на одном рисунке. Поэтому на рис. 5.12 приведены для примера такие зависимости для одного из объектов обработки, а на рис. 5.13 представлены зависимости для разных объектов, соответствующих рис. 5.9÷5.11, для одной и той же характерной точки – в центре изделия (точка T_1 , рис. 4.16), а также кривые изменения максимальной разности температуры в абсолютных ΔT_{\max} (3.1) и относительных ΔT_{\max}^* (3.2) значениях.

Из анализа полученных зависимостей (рис. 5.9÷5.13) и сведений табл. 5.1 можно сделать вывод, что практически во всех случаях даже после окончания стадии нагревания (т.е. после отключения подачи электроэнергии или существенного снижения мощности в целях получения изотермической стадии)

наблюдается дальнейшее заметное увеличение температуры с последующей стабилизацией этого параметра на более высоком уровне, чем ожидалось.

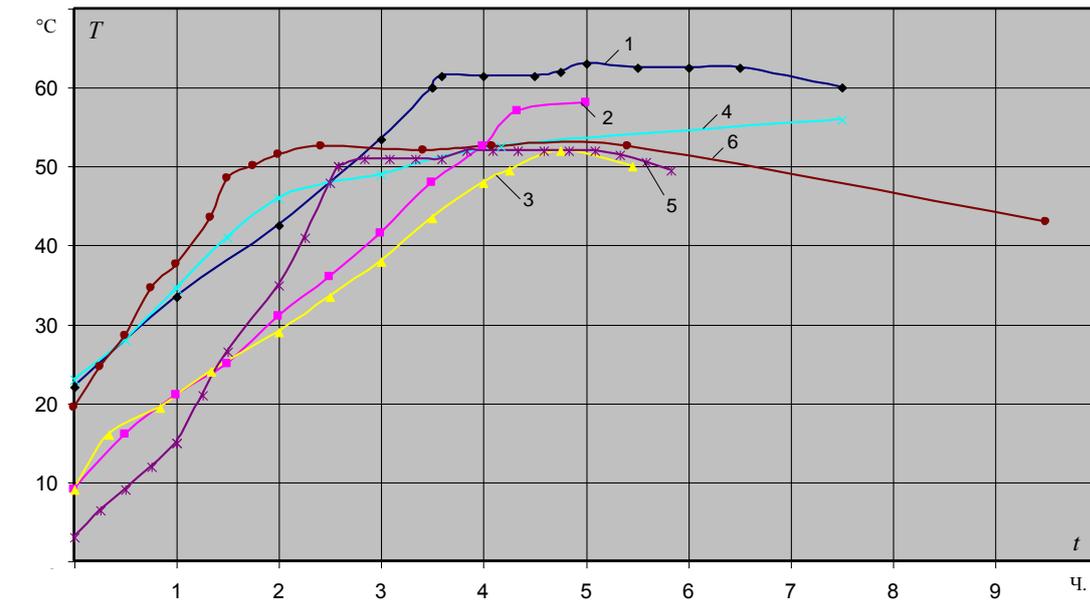


а)

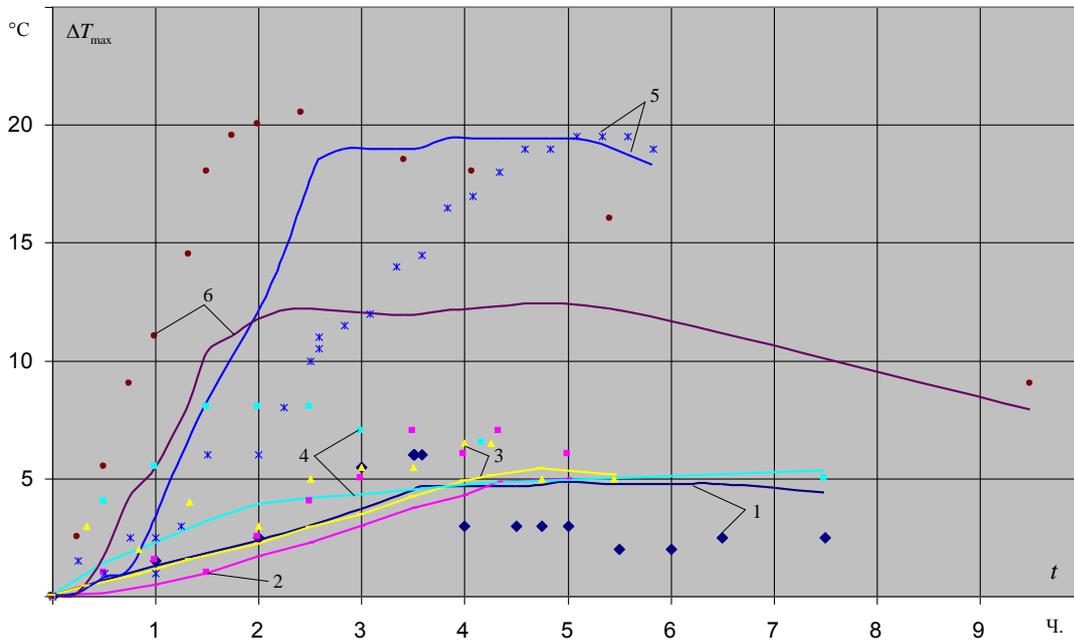


б)

Рис. 5.12. Зависимости температуры в различных точках объема материала от времени в ходе ЭТО: а – для объекта №4 (табл. 5.1); б – для объекта №6 (табл. 5.1); обозначения на поле рисунка – номера точек согласно рис. 4.16



а)



б)

Рис. 5.13. Зависимости температуры в центре изделия (точка T_1 , рис. 4.16) и максимальной разности температуры в объеме материала от времени в ходе ЭТО: а – зависимости для T_1 ; б – зависимости для ΔT_{\max} ; обозначения на поле рисунка – номера точек согласно рис. 4.16 (а), номер объекта согласно табл. 5.1 (б); точки – эксперимент, линии – расчет

Этот эффект, замеченный в предыдущих исследованиях [100] и получивший подтверждение в настоящей работе, обусловлен выделением тепла гидратации цемента, который при ЭТО электродным методом и при наличии качественной теплоизоляции на поверхности опалубки протекает одновременно и дружно по

всему объему материала в отличие от других методов тепловой обработки. Безусловно, такое явление следует рассматривать как весьма положительный фактор, т.к. оно позволяет уменьшить затраты электроэнергии и стоимость ЭТО, целесообразно посвятить отдельные исследования вопросу его наиболее эффективного использования на практике.

Согласно рис. 5.13,б хорошее согласование результатов расчета и эксперимента наблюдается при условиях, которые в наибольшей степени соответствуют возникновению стационарного температурного поля: после прекращения подачи на объект обработки электрического напряжения, в результате чего исчезают локальные искажения температурного поля и однородности тепловыделения вследствие влияния арматуры, при наличии теплоизоляции на поверхности опалубки, в результате чего теплоотдача с этой поверхности становится практически однородной, что соответствует теоретической модели (разд. 2.3) и при стабилизации температуры объекта (изотермическая стадия, начало стадии охлаждения). На стадии нагревания может наблюдаться некоторое расхождение результатов расчета и эксперимента, что свидетельствует о необходимости дальнейшего развития предложенной методики расчета температурного поля в трехмерном пространстве (разд. 2.3), которое позволит дополнительно учесть влияние различных факторов, в том числе некоторую нестационарность температурного поля в пределах этой стадии.

С использованием результатов рис. 5.7 и выражения (4.6) также построена зависимость удельного объемного сопротивления от температуры материала в процессе ЭТО, которая приведена на рис. 5.14 для двух характерных случаев: минимальной и максимальной длительности стадии нагревания.

Согласно рис. 5.14 наблюдается хорошее согласование результатов экспериментов, выполненных в настоящей работе, с результатами ранее выполненных исследований и разработок.

Как известно, из числа важнейших характеристик конструкционного бетона при любой технологии его изготовления наибольшее практическое значение принадлежит зависимости его предела прочности на сжатие $R_{сж}$ от времени

созревания. Эта характеристика, полученная в ходе исследований процессов ЭТО на опытно-промышленных установках при изготовлении всех полученных в опытах изделий, представлена на рис. 5.15.

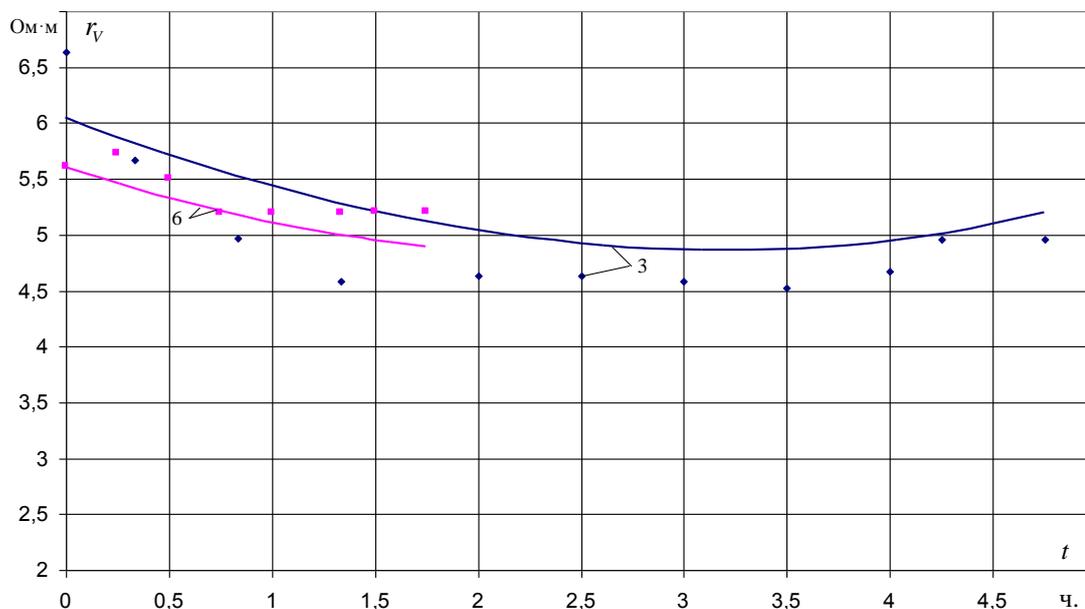


Рис. 5.14. Зависимость удельного объемного сопротивления от времени ЭТО: точки – эксперимент, линии расчет по методике [91,100]; обозначения на поле рисунка – номер объекта согласно табл. 5.1

Благодаря использованию во всех случаях бетона классов В20 и В10 все результаты измерения предела прочности на сжатие можно представить в виде общих зависимостей (рис. 5.15), согласно которым значение $R_{сж}$ в возрасте 28 суток превышает (в среднем) нормированное значение этого параметра $R_{сж}^{28}$ на 25÷30 %. Этот результат полностью подтверждает как качественно, так и количественно ранее установленный эффект активации процесса твердения бетона при использовании ЭТО токами повышенной частоты [100,111,133].

На всех рассмотренных рисунках (рис. 5.9÷5.15), кроме экспериментальных значений, представлены и расчетные кривые, полученные с помощью как ранее разработанных расчетных методик и входящих в состав методологии разработки и исследования процессов ЭТО токами повышенной частоты [100], так и вновь разработанных и представленных в настоящей работе (гл. 2), также являющихся составной частью этой методологии.

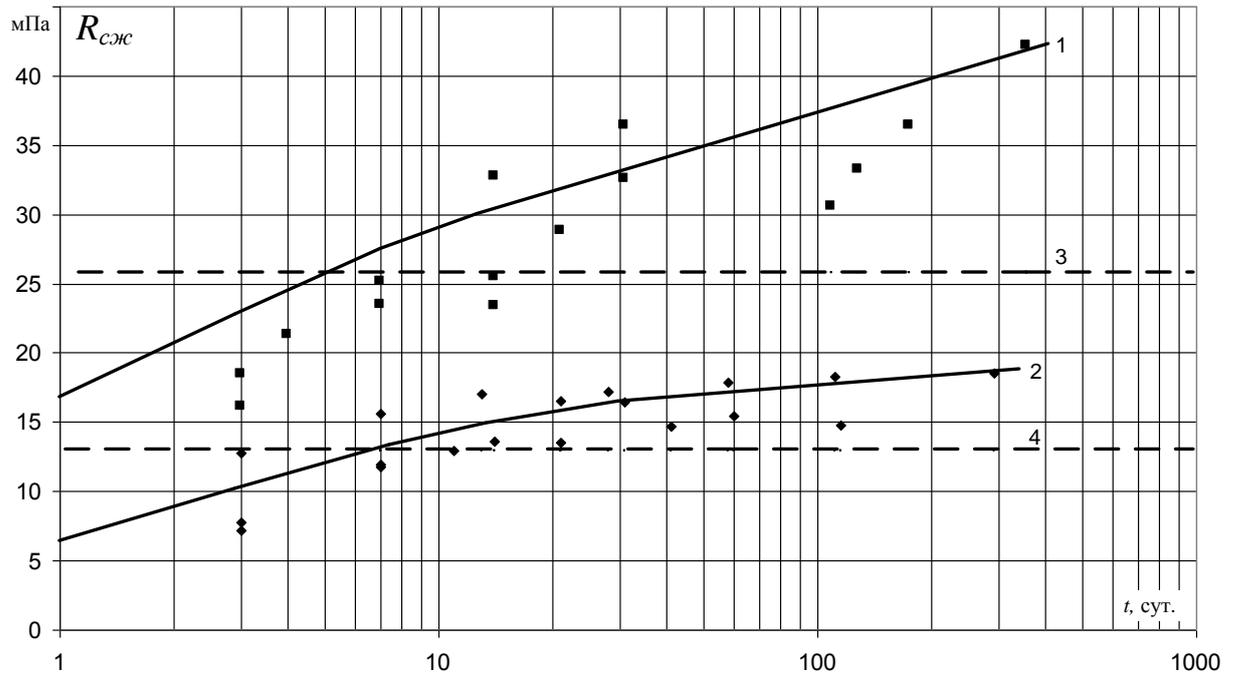


Рис. 5.15. Зависимость предела прочности при сжатии бетона класса В10 и В20, использованного в экспериментах, от времени его созревания: 1 – экспериментальные значения (■) и результаты расчета (линия) для бетона класса В20; 2 – экспериментальные значения (◆) и результаты расчета (линия) для бетона класса В10; 3 – нормированное значение предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток ($R_{сж}^{28}$) для бетона В20; 4 – нормированное значение предела прочности при сжатии в возрасте 28 суток ($R_{сж}^{28}$) для бетона В10; расчеты выполнены для $T_n = 10^\circ\text{C}$ (начальная температура бетона), $T_k = T_{изот} = 45^\circ\text{C}$ (конечная температура нагрева бетона), $T_B = 10^\circ\text{C}$ (температура воздуха), длительность стадии нагрева – 4 ч., длительность изотермической стадии – 4 ч., длительность стадии охлаждения – 16 ч.

Хорошее согласование результатов расчета и эксперимента (см. рис. 5.9÷5.15) убедительно подтверждают достоверность теоретических разработок.

5.3. Характеристики температурного поля в объеме железобетонных изделий в процессе их изготовления на опытно-промышленных установках

Как показано в гл. 3, при исследовании процессов ЭТО токами повышенной частоты наиболее важное значение имеют характеристики температурного поля в объеме железобетонных изделий, т.к. позволяют судить об условиях твердения бетона и отсутствии опасности повреждения материала вследствие возникновения

внутренних механических напряжений. При этом необходимо проверить соответствие результатов расчета и опыта в целях подтверждения предложенной методики расчета температурного поля в 3-х мерном пространстве (разд. 2.3), а также подтверждения выводов, сделанных на основе применения этой методики (гл. 3).

Однако то наглядное представление картины температурного поля, которое показано в разд. 3.3, оказывается неудобным для сравнения с результатами эксперимента. Значительно более точным является такое сопоставление при получении распределения температуры вдоль какой-либо оси или траектории в объеме материала.

На рис. 5.16 показаны расчетные кривые изменения температуры вдоль различных осей и опытные значения, полученные на основании зависимостей вида рис. 5.12, соответствующие различным моментам времени ЭТО железобетонных изделий в виде фундаментного блока типа ФБС 9.4.6.

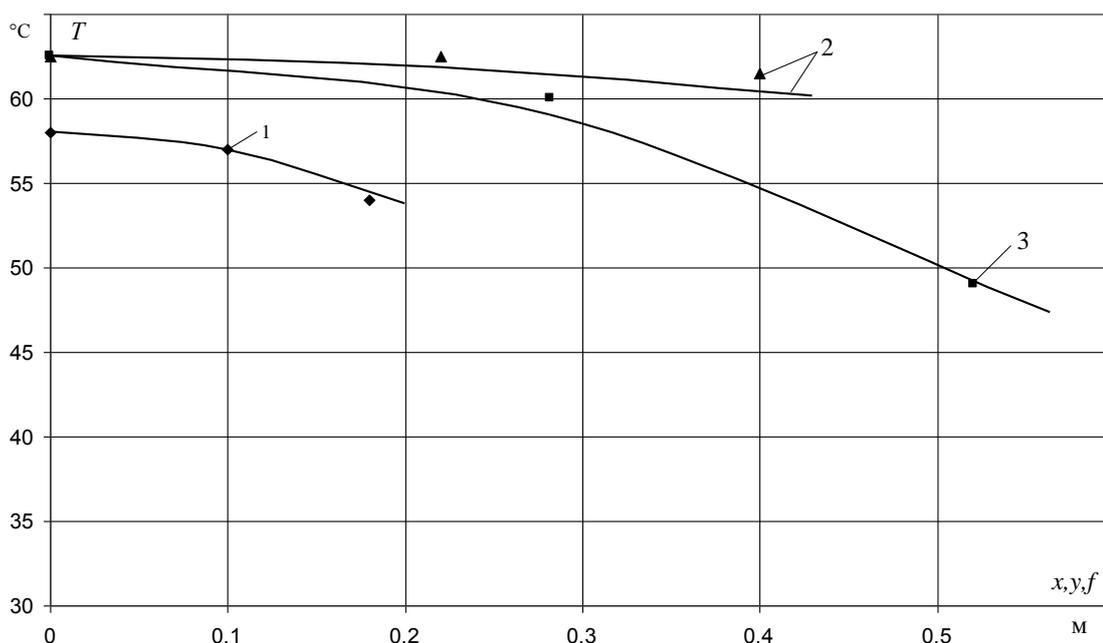


Рис. 5.16. Расчетные характеристики и опытные значения температурного поля в объеме фундаментных блоков типа ФБС 9.4.6 в ходе ЭТО при различных значениях температуры в центре изделия: 1 – изменение температуры вдоль оси y ; 2 – изменение температуры вдоль оси x ; 3 – изменение температуры вдоль прямой f ; линии – расчет, точки – эксперимент

На рис. 5.17÷19 представлены аналогичные зависимости для изделий в виде фундаментных блоков типа ФБС 12.4.6, железобетонных перемычек типа 9ПБ21-8-п и железобетонной сваи, соответственно.

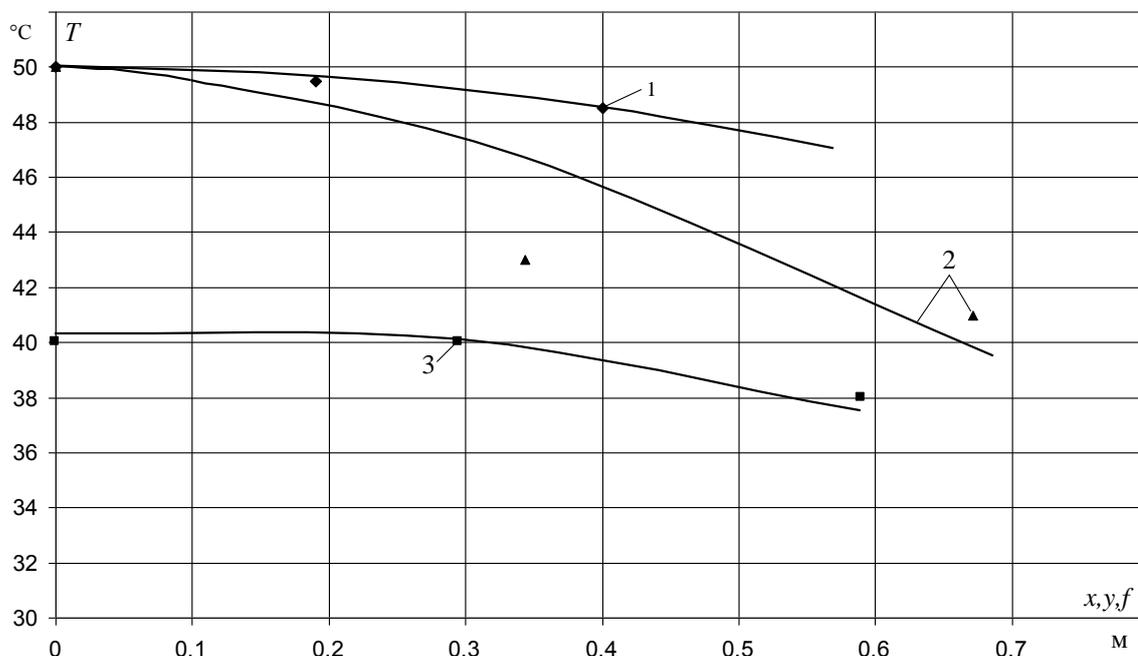
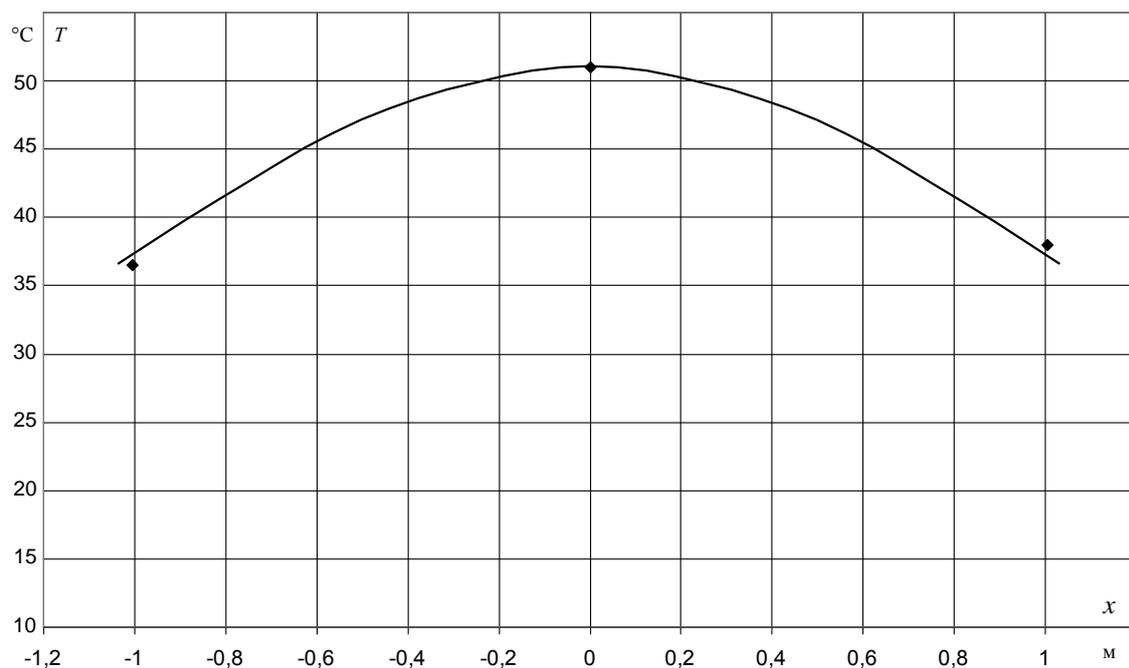


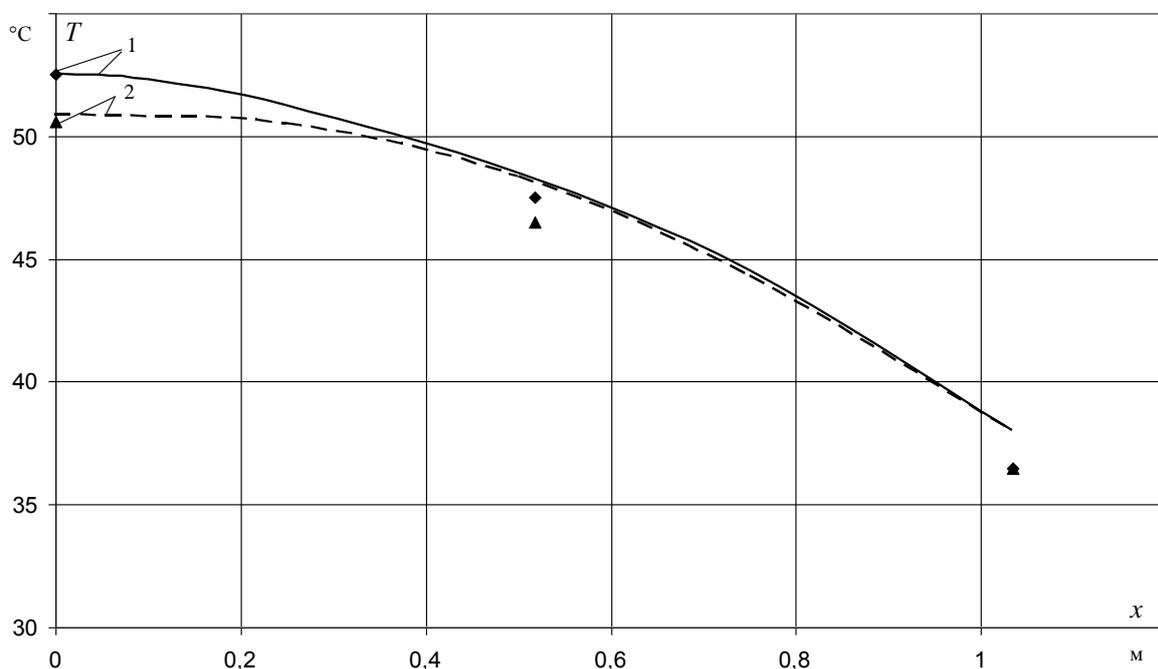
Рис. 5.17. Расчетные характеристики и опытные значения температурного поля в объеме фундаментных блоков типа ФБС 12.4.6 в ходе ЭТО: 1 и 3 – изменение температуры вдоль оси x при различных значениях температуры в центре изделия; 2 – изменение температуры вдоль прямой f ; линии – расчет, точки – эксперимент

Можно сделать заключение, что рис. 5.16÷5.19 свидетельствуют о приемлемом согласовании результатов эксперимента и вычислений с помощью предложенной расчетной методики (разд. 2.3), а также указывают на наличие проблемы: это достаточно большая неравномерность распределения температуры при большой длине железобетонного изделия. По-видимому, дальнейшие исследования в сфере ЭТО токами повышенной частоты должны быть посвящены решению этой проблемы.

Не меньший интерес и практическое значение представляют совместный анализ характеристик электрического и температурного поля в тех узлах обрабатываемого изделия, где возникает местная неоднородность электрического поля.



а)



б)

Рис. 5.18. Расчетные характеристики и опытные значения температурного поля в объеме железобетонных перемычек типа 9ПБ21-8-п в ходе ЭТО: а – изменение температуры вдоль всего изделия по оси x ; б – изменение температуры в пределах половины длины изделия (от середины к торцу); 1 – изменение температуры вдоль оси x ; 2 – изменение температуры вдоль наиболее длинного ребра изделия (т.е. параллельного оси x); линии – расчет, точки – эксперимент

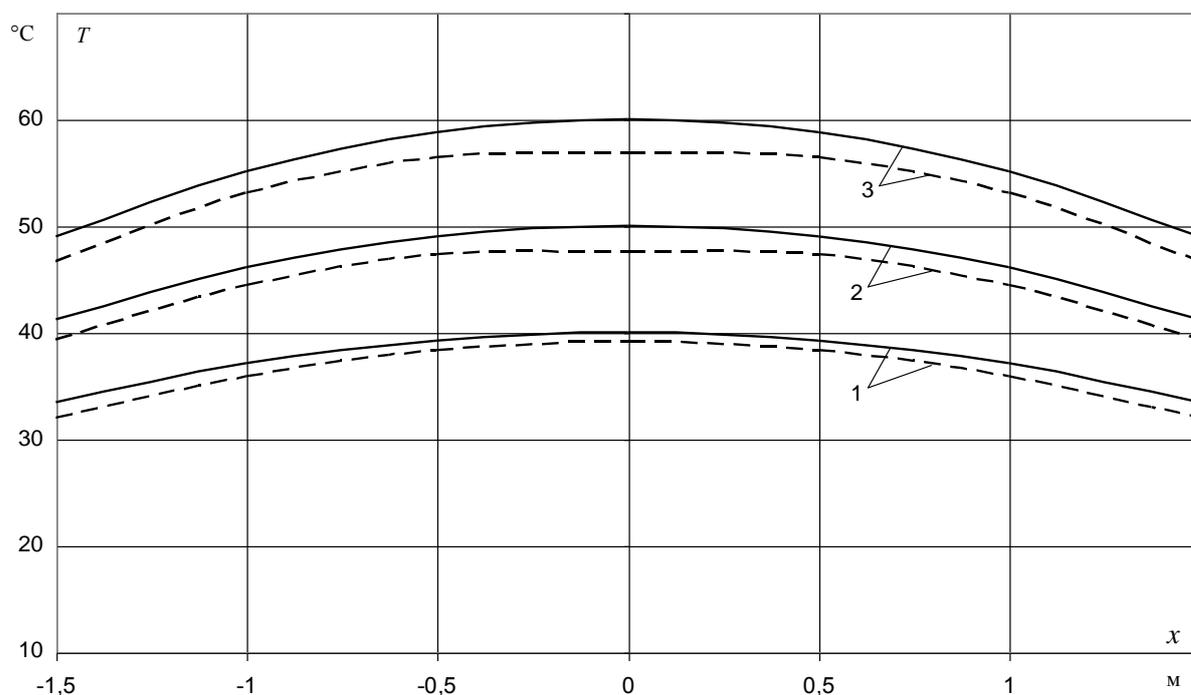


Рис. 5.19. Расчетные характеристики температурного поля в объеме железобетонной сваи в ходе ЭТО: сплошные линии – изменение температуры вдоль оси x по всей длине изделия; пунктирные линии – изменение температуры вдоль ребра изделия; температура в центре изделия 1 – 40 °C, 2 – 50 °C, 3 – 60 °C

Характерным примером такого узла является место расположения монтажной петли фундаментных блоков, когда электрический ток в ходе ЭТО протекает вдоль плоскости этой петли, что имеет место в принятой схеме ЭТО таких изделий (рис. 5.1, рис. 4.1, 4.2 – разд. 4.2). Стальная петля, находясь в толще бетона, электрически шунтирует часть материала, вызывает неоднородность электрического поля.

Согласно методике экспериментальных исследований (разд. 4.4) одновременно с измерением температуры в ходе ЭТО фундаментного блока типа ФБС 12.4.6 были выполнены измерения напряженности электрического поля (4.1) в окрестности монтажной петли посредством осциллографирования напряжения на зажимах измерительного зонда (разд. 4.4), как представлено на рис. 5.20

Полученные в этих опытах осциллограммы качественно не отличаются от осциллограмм напряжения на электродах опалубки (рис. 5.7), но имеют соответственно меньшую амплитуду ΔU , по величине которой были определены значения напряженности электрического поля с использованием выражения (4.1).

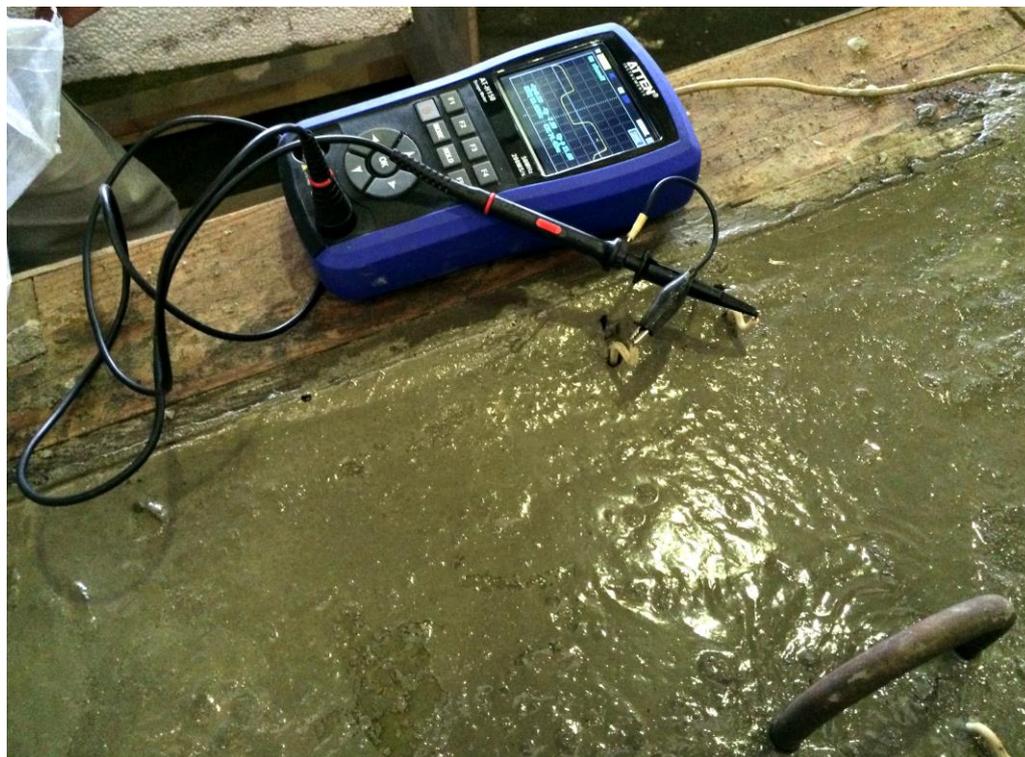


Рис. 5.20. Осциллографирование напряжения на зажимах измерительного зонда при измерении напряженности электрического поля в объеме материала вблизи монтажной петли

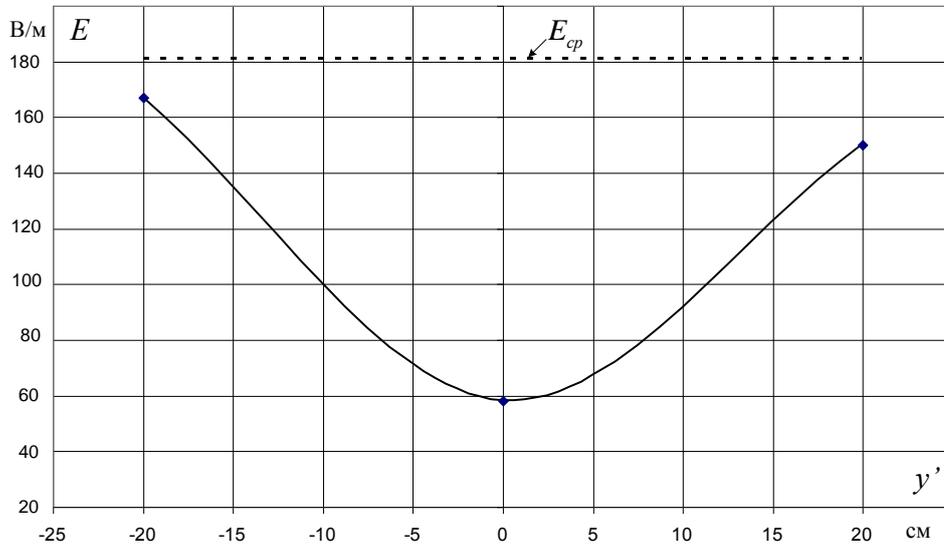
На рис. 5.21 представлены зависимости изменения напряженности электрического поля и температуры в разные моменты ЭТО вдоль прямой параллельной оси y (рис. 2.4) и перпендикулярной плоскости монтажной петли, полученные в результате опытов. Там же отмечено среднее значение напряженности, определяемое по формуле

$$E_{cp} = \frac{U_H}{L}, \quad (5.1)$$

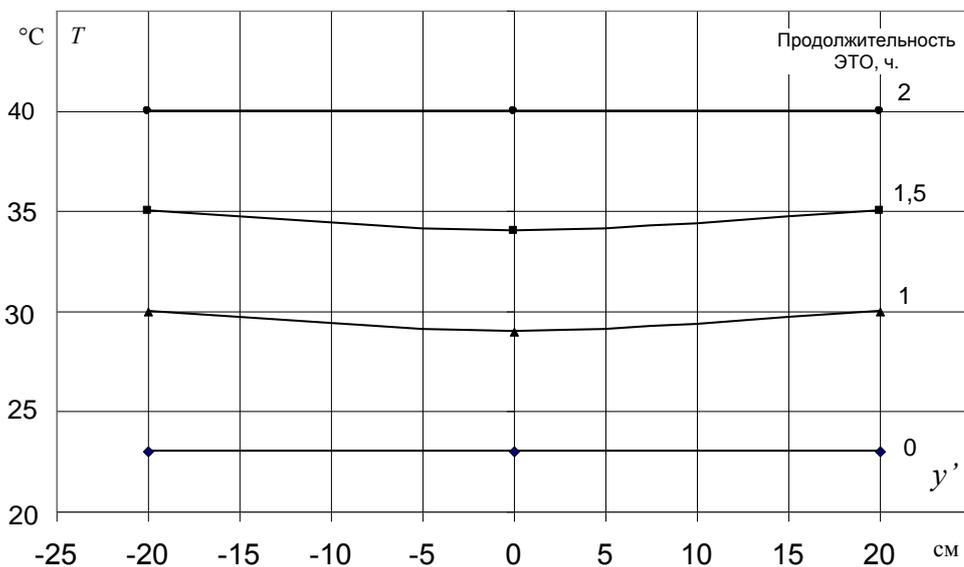
где $L = 1,18$ м – расстояние между электродами, т.е. длина обрабатываемого значения (фундаментный блок типа ФБС 12.4.6).

Из рис. 5.21 следует, что в месте расположения монтажной петли напряженность электрического поля отлична от нуля, но снижается по сравнению со средним значением приблизительно $3,3 \div 3,5$ раза. Причем такое влияние петли сказывается даже на предельном расстоянии от нее в поперечном направлении: вблизи боковых стенок опалубки, где напряженность поля оказалась ниже среднего значения в $1,2 \div 1,5$ раза.

Вдали от петли, в средней части изделия по длине, напряженность поля в поперечном направлении остается практически неизменной и равной среднему значению. Эксперименты показали, что картина изменения напряженности поля практически не зависит от продолжительности ЭТО.



а)



б)

Рис. 5.21. Изменение напряженности электрического поля (а) и температуры бетона (б) вдоль прямой расположенной по центру монтажной оси перпендикулярно ее плоскости (т.е. параллельно оси y' – рис. 2.1) при выполнении ЭТО фундаментного блока типа ФБС 12.4.6

С другой стороны наличие монтажной петли практически не сказывается на распределении температуры (рис. 5.21,б) при различных абсолютных значениях этого параметра, что качественно полностью соответствует выводам,

полученным в разд. 3.1. Действительно, если предположить, что если у стенки опалубки напряженность поля принять равной среднему значению, а в месте расположения петли равной нулю, то согласно рис. 3.1 при $y' = \pm 20$ см (расстояние от стенки до петли) температура в этих точках не должна отличаться более, чем на один градус, что соответствует зависимостям рис. 5.21,б.

Полученные результаты (рис. 5.21) в значительной мере устраняют сомнения в возможности применения ЭТО электродным методом при изготовлении густоармированных железобетонных изделий, когда не удастся избежать появления неоднородных электрических полей в объеме материала. Это обстоятельство не должно приводить к появлению неоднородных температурных полей и опасных внутренних механических напряжений в обрабатываемом изделии.

В настоящее время не представляется возможным выполнить достаточно точно измерения градиентов температуры для сравнения опытных значений этого показателя с расчетными значениями (разд. 3.4) в целях проверки достоверности предложенной методики (разд. 2.3) при определении этого важного параметра температурного поля. Такую проверку целесообразно выполнить косвенным способом: посредством сравнения опытных и расчетных значений максимальной разности температуры в объеме материала ΔT_{\max}^* поскольку величина этого параметра достаточно точно коррелируется с максимальной величиной градиента температуры (разд. 3.3÷3.4). На рис. 5.22 представлены опытные и расчетные зависимости ΔT_{\max} от температуры в центре изделия при выполнении ЭТО. Причем опытные значения получены посредством обработки опытных зависимостей вида рис. 5.13.

Зависимости рис. 5.22 свидетельствуют о приемлемом согласовании результатов расчета и эксперимента. Результаты рис. 5.22 также убедительно подтверждают значительное и благоприятное влияние наличия теплоизоляции на поверхности опалубки на примере зависимостей для железобетонных перемычек.

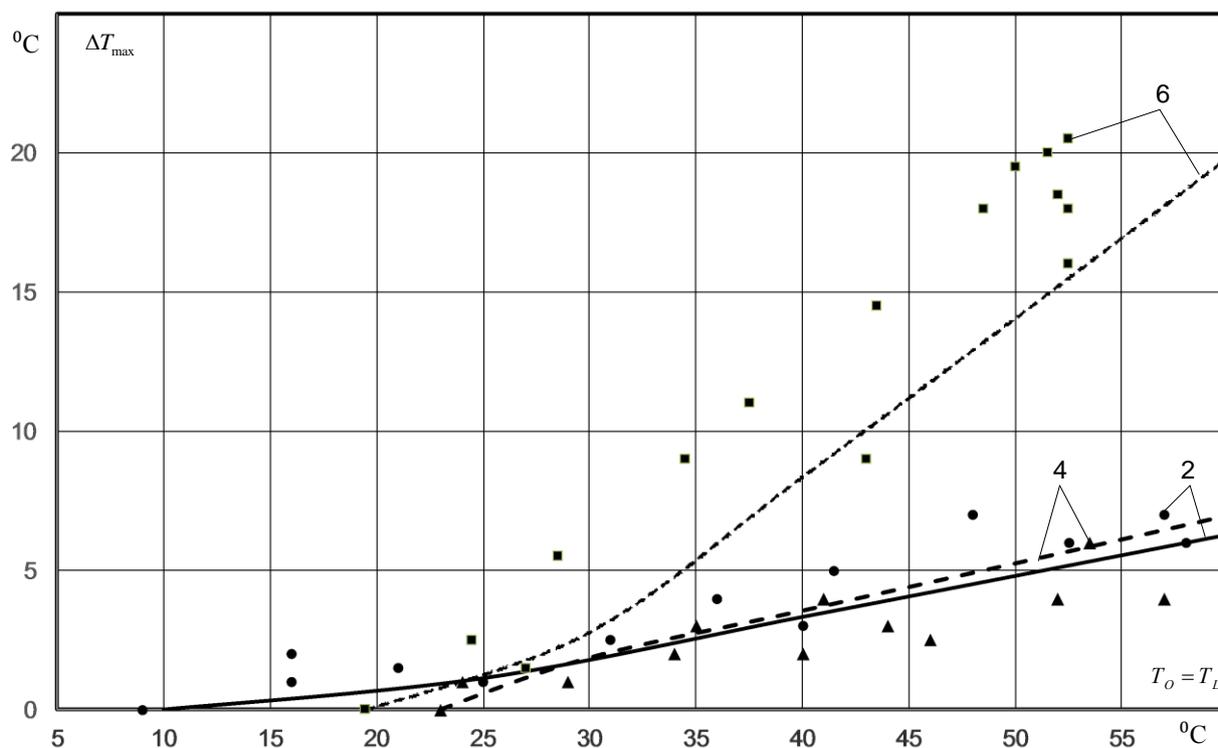


Рис. 5.22. Опытные и расчетные зависимости максимальной разности температур в объеме материала от температуры в центре изделия: цифры на поле чертежа – номер изделия согласно табл. 5.1

Действительно, при наличии теплоизоляции и при температуре в центре изделия $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше ΔT_{\max} снизилось в $2,5\div 4,5$ раза, а следовательно снижается и максимальное значение градиентов температуры (гл. 3).

5.4. Энергетические и стоимостные показатели процесса ЭТО железобетонных изделий на опытно-промышленных установках

Окончательные выводы о целесообразности использования ЭТО токами повышенной частоты могут быть сделаны только на основании изучения показателей технико-экономической эффективности такого технологического процесса. Хотя ранее выполненные исследования свидетельствуют о высокой экономической эффективности ЭТО [100,102], эти результаты требуют дополнительной проверки применительно к реальным изделиям и производственным условиям. Поэтому, при исследовании процесса ЭТО с

использованием опытно-промышленных установок было уделено большое внимание оценке показателей энергетической эффективности и стоимости ЭТО токами повышенной частоты.

С использованием опытных зависимостей вида рис. 5.10 и формулы (4.7) были определены значения электрической энергии, переданной в объект электротепловой обработки. Полученные результаты представлены на рис. 5.23 в виде столбчатой диаграммы.

Результаты, представленные на рис. 5.23, целесообразно также отобразить в виде значений удельной энергии, т.е. израсходованной энергии, отнесенной к единице объема изделия $V_{изд}$, и определяемой с помощью соотношения

$$W_V = \frac{W}{V_{изд}}. \quad (5.2)$$

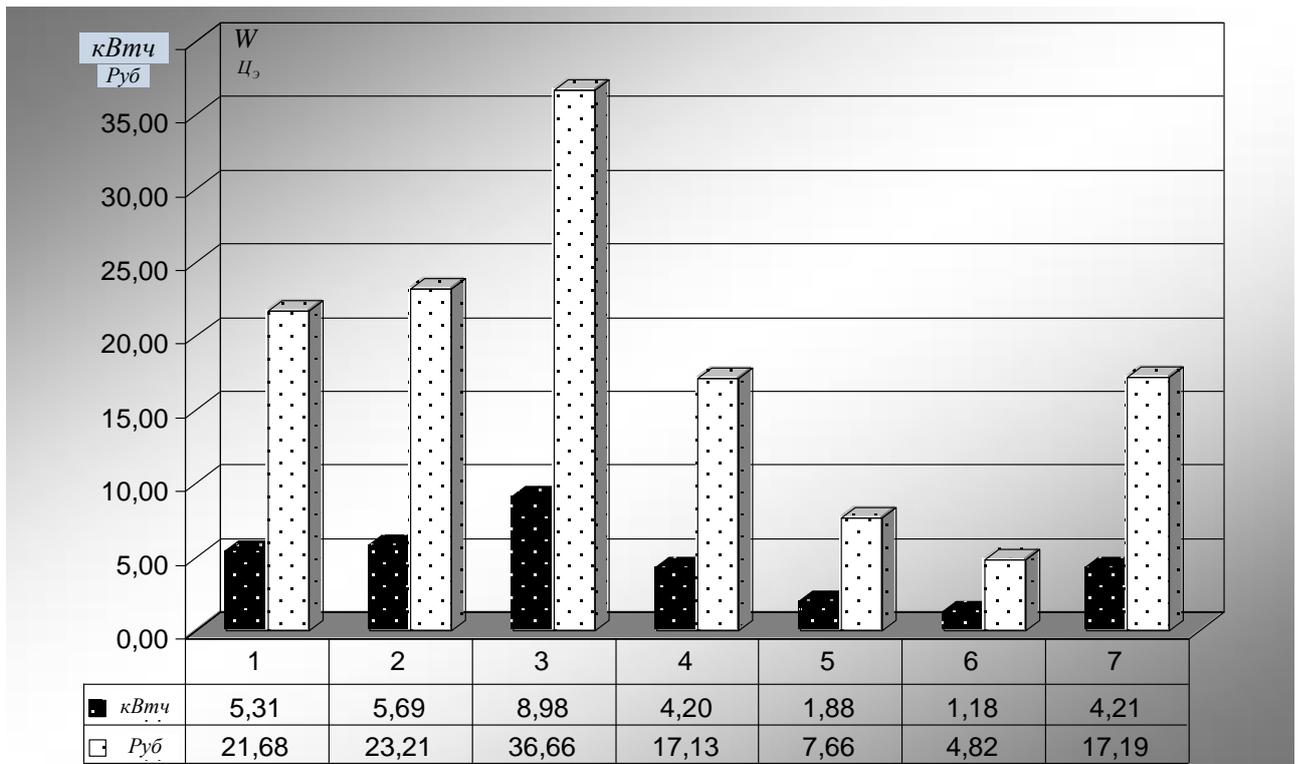


Рис. 5.23. Значения электрической энергии W , затраченной на выполнение ЭТО, и ее стоимости C_z при изготовлении различных изделий согласно табл. 5.1

Знание полной и удельной энергии позволяет определить их стоимость с помощью следующих соотношений [100]

$$\begin{aligned} C_{\text{Э}} &= W \cdot T_{\text{Э}}, \\ C_{\text{ЭV}} &= W_{\text{V}} \cdot T_{\text{Э}}. \end{aligned} \quad (5.3)$$

На рис. 5.24 приведены значения удельной энергии, а также ее стоимости, полученные в результате экспериментов на опытно-промышленных установках, а также расчетным способом с помощью упомянутой выше инженерной методики расчета установок ЭТО периодического действия [100,119]. Стоимостные показатели также отражены и на рис. 5.23.

Естественно, в целях объективной оценки эффективности ЭТО токами повышенной частоты необходимо сравнить полученные значения (рис. 5.24) с аналогичными показателями для традиционной тепловлажностной обработки водяным паром (ТВО). Поэтому на рис. 5.24 представлены усредненные значения удельного расхода энергии пара [100] на осуществление ТВО на предприятии КПД, а также его стоимости, которая определена с использованием тарифа по состоянию на январь 2018 г.

Как показано в [100,119], независимо от вида тепловой обработки железобетонных изделий для заданного вида и класса бетона, а также режима электротепловой обработки физической константой фактически является значение удельной энергии разогрева бетона, которую можно определить из соотношения

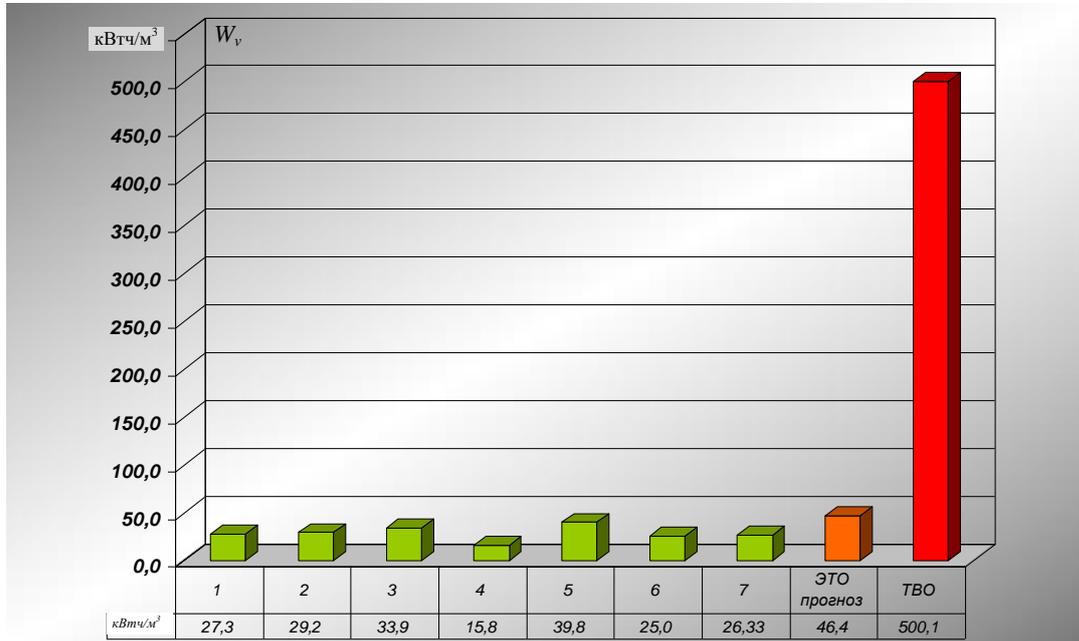
$$\omega_{\text{б}} = \rho_{\text{б}} \cdot c_{\text{б}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}), \quad (5.4)$$

где $\rho_{\text{б}}$ и $c_{\text{б}}$ – плотность и удельная теплоемкость бетонной смеси; $T_{\text{к}} = T_{\text{изот}}$ – конечная температура нагрева бетона; $T_{\text{н}}$ – начальная температура бетона.

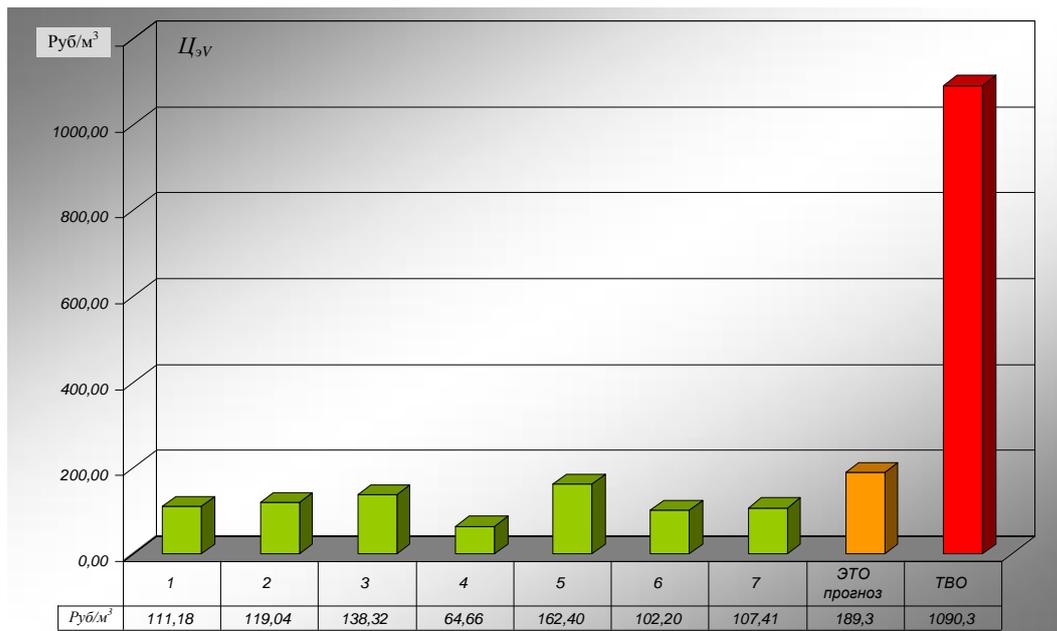
Величину $\omega_{\text{б}}$ целесообразно применять в качестве базового значения при сравнительных оценках энергетической эффективности различных способов и разновидностей тепловой обработки бетона, а также различных железобетонных изделий. Знание этого параметра позволяет определить значение другого показателя энергетической эффективности – коэффициента полезного действия

(КПД) процесса тепловой обработки как отношение полезной энергии ω_6 к величине фактически затраченной энергии W_V [100,119], т.е.

$$\eta = \frac{\omega_6}{W_V}. \quad (5.5)$$



a)



б)

Рис. 5.24. Значения удельной энергии (а), а также ее стоимости (б): зеленая заливка – результаты эксперимента согласно табл. 5.1; оранжевая заливка – прогноз для ЭТО на основании ранее выполненных исследований [100,119]; красная заливка – усредненные значения для ТВО [100]

При использовании формулы (5.4) возникает некоторая неопределенность с определением T_k . Действительно, как показали детальные теоретические (разд. 3.3) и экспериментальные (разд. 5.2 и 5.3) исследования материал не имеет одинаковой температуры по всему объему, и она распределена в пространстве по нелинейному закону. Теоретически, точное значение ω_0 может быть найдено посредством интегрирования во всему объему изделия величины энергии нагрева, сосредоточенной в бесконечно малом элементе объема с учетом фактического распределения T_k . Однако решить такую задачу достаточно сложно, и, по-видимому, для инженерных расчетов с использованием формулы (5.4) целесообразно воспользоваться усредненным значением конечной температуры, определяемым с учетом (3.1) из соотношения

$$T_k = T_{Ц} - \frac{\Delta T_{\max}}{2} = \frac{T_{Ц} - T_{\min}}{2}, \quad (5.6)$$

т.е. как среднее значение между наибольшей и наименьшей величиной температуры в объеме материала. Анализ теоретических и экспериментальных результатов (разд. 3.3, 5.2 и 5.3) дает основание сделать вывод, что использование формулы (5.6) приведет к получению с помощью (5.4) и (5.5) несколько заниженных значений ω_0 и η , что можно считать вполне допустимым, т.к. позволит избежать в дальнейшем возможных ошибок при проектировании и эксплуатации установок для изготовления железобетонных изделий с помощью ЭТО.

Сведения о КПД наиболее показательны выглядят в виде зависимостей этого параметра от времени ЭТО. На рис. 5.25 представлены такие зависимости, полученные для всех испытанных объектов обработки с использованием опытных зависимостей вида рис. 5.10, а также соотношений (4.7), (5.2), (5.4), (5.5) и (5.6). Несмотря на некоторые количественные отличия, обусловленные отличиями в параметрах изделий, температурой окружающего воздуха, отсутствием теплоизоляции опалубки в некоторых опытах, различием в графике тепловой обработки и др., все зависимости имеют качественно одинаковый характер. На

начальном этапе КПД имеет невысокие значения, затем наблюдается постоянное и довольно быстрое увеличение этого параметра, а к окончанию ЭТО этот параметр достигает и иногда превышает значение 100 %. Такой характер полученных зависимостей можно объяснить особенностями химических процессов в твердеющем бетоне. После затворения бетона водой и на ранних стадиях его нагревания в ходе ЭТО преобладает процесс гидролиза клинкерных составляющих цемента, который является эндотермическим [133]. В этот период времени ЭТО значительная доля подводимой энергии расходуется не только на нагрев материала, но и на осуществление реакций гидролиза. Поэтому КПД, который определяется только с учетом энергии, затраченной только на нагрев, имеет сравнительно небольшую величину. Однако в дальнейшем по мере завершения гидролиза возникают и ускоряются экзотермические химические реакции гидратации клинкерных составляющих с выделением в объеме материала достаточно большого количества тепла [1,4-7,133].

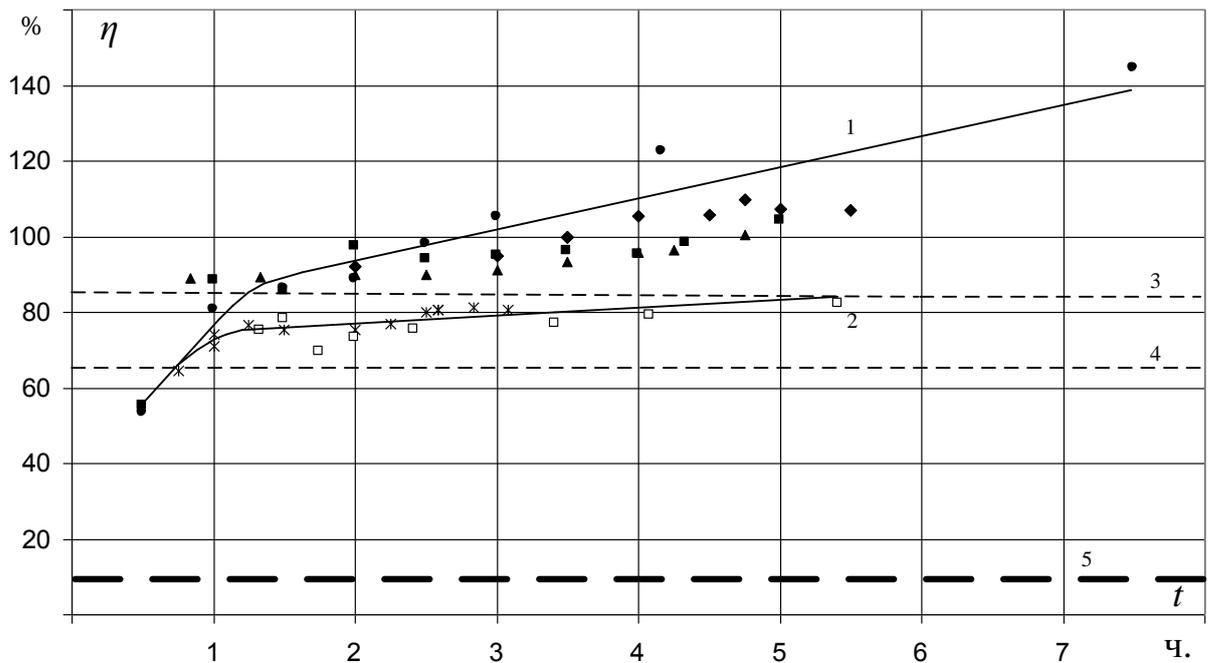


Рис. 5.25. Зависимости КПД процесса ЭТО от времени: 1 – обобщенная зависимость для фундаментных блоков; 2 – обобщенная зависимость для железобетонных перемычек; 3 – расчетное значение КПД для фундаментных блоков; 4 – расчетное значение КПД для железобетонных перемычек; усредненное значение КПД ТВО

В отличие от ТВО при ЭТО благодаря достаточно равномерному температурному полю процесс гидратации и выделение его тепла происходят равномерно и дружно по всему объему материала. В результате тепло гидратации цемента добавляется к теплу от воздействия электрического тока и приводит к ускорению нарастания температуры материала и заметному превышению ею ожидаемых значений, определяемых из величины подведенной электрической энергии. Это приводит к росту КПД, определяемого из соотношения (5.5) с учетом (5.4) и (5.6), вплоть до достижения и превышения 100 % -ной отметки.

Хотя эффект от тепла гидратации был замечен в ходе предыдущих исследований процесса ЭТО бетона токами повышенной частоты [100], однако, столь сильное влияние этого фактора на показатели энергетической эффективности процесса ЭТО (рис. 5.25) выявлено в настоящей работе впервые и благодаря исследованиям этого процесса с использованием опытно-промышленных установок. Безусловно этот эффект представляет собой весьма положительное явление, т.к. его использование может заметно сократить затраты электроэнергии на ЭТО. По-видимому, в дальнейшем, целесообразно продолжить исследования в целях максимального использования этого эффекта, которые, впрочем, в теоретической части будут затруднены отсутствием методик точного определения количества тепла гидратации с учетом большого числа факторов: марка и активность цемента, рецептура бетона, график тепловой обработки, параметры опалубки и др.

На рис. 5.25 отмечен также характерное усредненное значение КПД традиционной ТВО, согласно литературным источникам, сравнение с которым зависимостей для ЭТО демонстрирует преимущество этого процесса тепловой обработки, причем в большей степени, чем это было показано в предыдущих исследованиях [100].

5.5. Выводы по главе 5

- 1) Достаточно обширный экспериментальный материал, полученный в настоящей работе, свидетельствует о достоверности предложенных в настоящей работе способа реализации принципа суперпозиции градиентов температуры при расчете температурного поля в трехмерном пространстве и разработанной на основе этого принципа методики численно-аналитического расчета процесса теплопереноса и стационарного температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонного изделия при его электротепловой обработке; предложенная численно-аналитическая методика достаточно проста и удобна в употреблении, а также доступна широкому кругу специалистов, что ее выгодно отличает от существующих сложных численных методов решения полевых задач [115,116,135], требующих от пользователя специальной подготовки и высокой квалификации.
- 2) Случаи некоторого расхождения результатов расчета и эксперимента наблюдаются в ситуациях, когда условия ЭТО в наименьшей степени соответствуют возникновению стационарного температурного поля, например на стадии нагревания при достаточно большой скорости подъема температуры, низкой температуре окружающего воздуха и отсутствии теплоизоляции на поверхности опалубки.
- 3) Целесообразно дальнейшее развитие и совершенствование предложенной численно-аналитической методики расчета температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонного изделия в целях получения возможности выполнять инженерные расчеты характеристик не только стационарных, но и нестационарных температурных полей [136,137], а также учитывать зависимость теплофизических параметров материала от различных факторов [138] в целях более точного моделирования процессов электротепловой обработки, т.е. более квалифицированного решения вопросов разработки и применения процессов ЭТО на практике.

4) Результаты теоретических исследований, выполненных методами компьютерного моделирования позволили сразу же осуществить разработку и изготовление оборудования, пригодного для промышленного применения без промежуточных экспериментальных разработок и исследований.

5) Результаты экспериментов в производственных условиях с использованием разработанных опытно-промышленных установок убедительно подтверждают целесообразность и возможность широкого применения процессов ЭТО токами повышенной частоты электродным методом на предприятиях сборного железобетона, например удельные затраты энергии на выполнение тепловой обработки таким способом снижаются по сравнению с традиционной ТВО в $12 \div 30$ раз, а ее стоимость в $6 \div 16$ раз; причем, показатели энергетической и стоимостной эффективности превосходили ожидаемые значения, полученные по результатам ранее выполненных исследований; кроме этого, полностью подтвердился ранее установленный эффект активации процесса твердения бетона при использовании ЭТО токами повышенной частоты. Благодаря экспериментам с использованием опытно-промышленных установок впервые обнаружено явление, когда энергетическая эффективность (КПД) процесса ЭТО токами повышенной частоты может превышать 100% благодаря эффективному использованию тепла гидратации цемента.

6) Разработанное, изготовленное и испытанное в ходе выполнения настоящей работы опытно-промышленное оборудование полностью подтвердило свою работоспособность и уже практически пригодно для промышленного, серийного производства железобетонных изделий; целесообразна его дальнейшая постоянная эксплуатация в целях уточнения ресурса, технико-экономических показателей, выявления и устранения конструктивных показателей.

7) Опытные-промышленные установки, представленные в работе, в равной степени удобны и пригодны для эксплуатации как в условиях крупных, так и мелких или средних предприятий строительной отрасли; в настоящей работе не проводилась оценка стоимости такого оборудования, однако, как показывают ранее выполненные оценки [100], она многократно ниже стоимости установок

традиционных методов тепловой обработки (ТВО, обработка продуктами сгорания газа).

8) Целесообразно продолжение научно-технических исследований и разработок в сфере процессов ЭТО токами повышенной частоты в целях расширения номенклатуры изделий, изготавливаемых с использованием такой тепловой обработки, совершенствования и оптимизации оборудования и технологического процесса. В частности, весьма актуальной является задача применения ЭТО токами повышенной частоты индукционным методом [137,139], например, при изготовлении тонкостенных объемных и густоармированных железобетонных изделий, когда использование электродного метода затруднено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящей работе показано, что при разработке и применении на практике процессов ЭТО токами повышенной частоты при изготовлении железобетонных изделий на предприятиях сборного железобетона центральное место принадлежит процедуре расчета характеристик температурного поля в объеме изделия в ходе такой обработки. Разработана методика расчета характеристик одномерного стационарного температурного поля в объеме железобетонного изделия при неоднородном тепловыделении в процессе ЭТО, с помощью которой установлено что, однородное выделение тепла в объеме материала является далеко не самым лучшим вариантом электротермической обработки, и значительно более однородное температурное поле в стационарном режиме достигается в том случае, если имеет место снижение объёмной плотности мощности в направлении распространения теплового потока.

2. Предложен и обоснован принцип расчета температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонных изделий в ходе их электротепловой обработки (ЭТО) электродным методом, базирующийся на суперпозиции градиентов температуры и интегрировании функции его изменения в пространстве с учетом знака градиента при перемещении от начальной точки с известной температурой к конечной с произвольными координатами, где температура определяется как сумма температуры в начальной точки и интеграла градиента температуры.

3. Разработана оригинальная инженерная методика численно-аналитического расчета процесса теплопередачи и характеристик стационарного температурного поля в трехмерном пространстве объема железобетонного изделия (с равномерным тепловыделением по всему объему), подвергающемуся ЭТО электродным методом, доступная широкому кругу пользователей.

4. Теоретические исследования характеристик температурного поля применительно к реальным изделиям с помощью предложенной численно-аналитической методики показали, что эта методика представляет собой эффективный инструмент исследования температурных полей в объеме

железобетонных изделий в целях создания необходимого оборудования и выбора режимов процесса ЭТО. Показано, что для устранения опасности повреждения материала (бетона) внутренними механическими напряжениями, вызванных градиентами температуры, скорость подъема температуры на стадии нагревания должна быть не более $5\div 7$ °С/ч. при температуре разогрева материала не выше $45\div 48$ °С и при толщине слоя теплоизоляции (пенопласта) не менее $4\div 6$ см

5. Разработанные и изготовленные опытно-промышленные установки позволили выполнить экспериментальные исследования характеристик процесса ЭТО токами повышенной частоты в производственных условиях, которые подтвердили достоверность теоретических разработок и целесообразность широкого применения таких процессов на предприятиях сборного железобетона. Например, удельные затраты энергии на выполнение ЭТО снижаются по сравнению с традиционной ТВО в $12\div 30$ раз, а ее стоимость в $6\div 16$ раз, причем. Подтвердился ранее установленный эффект активации процесса твердения бетона при использовании ЭТО токами повышенной частоты и впервые обнаружено явление, когда энергетическая эффективность (КПД) такого процесса может превышать 100% благодаря эффективному использованию тепла гидратации цемента. Опытные-промышленные установки, представленные в работе, уже пригодны для промышленного использования производственных условиях.

В целом, можно сделать вывод, что в настоящей работе сделан существенный вклад в дальнейшее развитие и совершенствование методологии создания и применения процессов ЭТО токами повышенной частоты, который значительно увеличивает возможности и эффективность этого теоретического инструмента для решения практических вопросов применения ЭТО в производстве. Также окончательно доказана возможность и целесообразность широкого применения ЭТО токами повышенной частоты на предприятиях строительной отрасли.

Список литературы

1. **Руководство** по прогреву бетона в монолитных конструкциях/ под ред. Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумяна, А.И. Звезда – М.: НИИЖБ, 2005. -276 с.
2. **Электротехнологические** промышленные установки/ И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свечанский; под ред. А.Д. Свечанского. – М.: Энергоатомиздат, 1982. 400 с.
3. **Ястребов, П.П.** Электрооборудование и электротехнология/ П.П. Ястребов, И.П. Смирнов – М.: Высш. шк. 1987. 199 с.
4. **Железобетонные** и каменные конструкции/ Бондаренко В.М., [и др.] под ред. В.М. Бондаренко – М.: Высш. шк., 2007. 887 с.
5. **Афанасьев, А.А.** Бетонные работы/ А.А. Афанасьев – М.: Высш. шк., 1991. 288 с.
6. **Баженов, Ю.М.** Технология бетона/ Ю.М. Баженов – М.: Изд-во АСВ, 2003. 500 с.
7. **Алимов, Л.А.** Технология бетона, строительных изделий и конструкций: учебник для вузов/ Л.А. Алимов, Ю.М. Баженов, В.В. Воронин – М.: Изд-во АСВ, 2004. 256 с.
8. **Бубело, В. В.** Некоторые проблемы тепловлажностной обработки бетона/ В.В. Бубело// Бетон и железобетон. 1993. №6.
9. **Леньшин, В. П.** Гибкая технология ускоренного тверждения железобетонных изделий. Обзорная информация/ В.П. Леньшин, В.Л. Марцлыкевич – МолдНИНТИ, Кишинев,,: 1990.
10. **Трембицкий, С.М.** Основные направления совершенствования и развития тепловой обработки сборного железобетона/ С.М. Трембицкий//Энергетическое строительство. 1990. №10.
11. **Цыро, В.В.** Применение кассетно – конвейерных линий при реконструкции завода КЖД/ В.В. Цыро и др.// Бетон и железобетон. 1991. №4. С. 4-6.
12. **Солдаткин, Н.Т.** Предварительный разогрев бетонной смеси в бункере бетоноукладчика, снабженного паровым регистром. Совершенствование

- бетонных работ и интенсификация использования техники: сборн. научн. тр./Н.Т. Солдаткин, М.З. Шульман// Владимирский политех-нический институт. Владимир. 1990.
13. **Гныря, А.И.** Новое слово в технологии предварительного электроразогрева бетонной смеси/ А.И. Гныря, М.М. Титов // Строительные материалы XXI века (Технологии бетонов). 2008. №1. С.54-57.
 14. **Арбенев, А.С.** Возникновение и развитие технологии бетонирования с электроразогревом смеси/ А.С. Арбенев// Промышленный вестник. 1998. №6-7. С. 21-23.
 15. **Иванов, А.Д.** Использование АСУ при ТВО изделий из тяжелого бетона в камерах непрерывного действия: сборник научных трудов/ А.Д. Иванов, В.А. Гальбуров, А.Г. Протосевич, А.И. Орлович// Владимирский политехнический институт. Владимир. 1990.
 16. **Марухин, А.И.** Резервы снижения теплоэнергетических ресурсов при производстве железобетонных изделий: тез. Докл. юбилейной науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава и студентов/А.И. Марухин, Н.Т. Пузиков, В.В. Шанин// Горький, 1990.
 17. **Ильевский, Ю. А.** Математическое обоснование использования разогретых смесей при приготовлении и ремонте железобетонных конструкций в зимних условиях. Совершенствование технологии бетонных работ и интенсификации использования техники: сб. науч. тр./ Ю.А.Ильевский, В.В. Трофимов, Л.С. Китанина// Владимирский политехнический институт. – Владимир, 1990.
 18. **Куприянов, Н.Н.** Подогрев бетона в щелевых камерах продуктами сгорания природного газа/Н.Н. Куприянов, Т.Б. Мишина, С.А. Дикарь// Бетон и железобетон. 1993. №7.
 19. **Пособие** по тепловой обработке железобетонных изделий продуктами сгорания природного газа (к СНиП 3.09.01-85). Утверждено приказом НИИЖБ Госстроя СССР от 14 апреля 1986 г. № 21

20. **Куприянов, Н.Н.** Влияние тепловлажностной обработки в среде продуктов сгорания природного газа на свойства тяжелого бетона/Н.Н. Куприянов, Л.А. Малинина, В.В. Панков// Бетон и железобетон. 1990. №12.
21. **Корнеев, А.Д.** Экспериментальные исследования тепловлажностной обработки бетона продуктами сгорания природного газа/А.Д. Корнеев, В.Я. Губарев, Д.С. Синельников, В.Г. Соловьев// Строительные материалы. – 2007. №1. С. 30-31.
22. **Разрушение** бетонных конструкций с помощью лазера// Cement and concrete. –S.L. 1987. №9.
23. **Технологии** изготовления железобетонных изделий и конструкций.
<http://www.stroyinform.ru/techno/detail.php?ID=70509>
24. **Малинский, Е.** Бетон: загорать выгоднее, чем париться/Е. Малинский// Изобретатель и рационализатор. 1991. №10.
25. **Борбоев, А.М.** Тепловая обработка изделий из тяжелого бетона в теплоаккумулирующих гелиокамерах: автореф.дис. канд. техн. наук./ Борбоев Ашир Али Маматканович. 1993.
26. **Коренюк, А.Г.** Тепловая обработка бетона в кассетных установках с использованием солнечной энергии. Наука и техника в городском хозяйстве/ А.Г. Коренюк, З.Х. Задорожная// Комплексное благоустройство городов: республиканский межведомственный науч.-техн. сб. Вып.73. Киев. –990.
27. **Ильина, И.М.** Гелиополигоны для производства железобетонных изделий. Передовой научно- практический опыт, рекомендованный для внедрения в строительство объектов агропромышленного комплекса: научно – техническая информация, сборник ЦНИИЭП –сельстрой, 1994. Вып. 8.
28. **Варданян, Э.Ц.** Технология тепловой обработки сборного железобетона при полигонном производстве с применением солнечной энергии, инфракрасного и конвективного нагревов: автореф. дис. канд. техн. наук./Варданян Эдвард Церунович. М., 1990. 24 с.

29. **Крылов, Б.А.** Гелиотехнология производства сборных железобетонных изделий на полигонах/ Б.А. Крылов, Л.Б. Аруова//Технология бетонов. – 2005. -№5. –С.66-67.
30. **Аруова, Л.Б.** Гелиотермообработка железобетонных изделий с использованием пленкообразующих составов/ Л.Б. Аруова// Бетон и железобетон. –1994. -№4. –С.23.
31. **Крылов, Б.А.** Тепловлажностная обработка изделий в гидроаэроциркуляционных камерах с использованием солнечной энергии/В.А. Крылов, Е.М. Малинский, А.И. Ли, Н.А. Упаков// Бетон и железобетон. – 1990. - №2.
32. **Крылов, Б.А.** Комбинированная гелиобработка железобетонных изделий в Республике Казахстан/Б.А. Крылов, Л.Б. Аруова// Бетон и железобетон. – 2007. - №4. – С. 11-13
33. **Трембицкий, С.М.** Энергосберегающие технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций/ С.М. Трембицкий// Бетон и железобетон. –2006г. -№6. –С. 23-26.
34. **Руденко, И.Ф.** Направления совершенствования и технического перевооружения производства сборного железобетона/ И.Ф. Руденко, В.А. Новоселов// Бетон и железобетон. – 2006. - №6. –С. 2-8.
35. **Крылов, Б.А.** Электроразогрев бетонных смесей и перспективные области его применения / Б.А. Крылов// Строительные материалы. – 2002. -№5. –С.8-10.
36. **Электроразогрев железобетонных изделий с помощью пластинчатых электронагревателей.** Каталог паспортов и передовой производственный опыт в строительстве, рекомендованный для внедрения, М. 1989г., Вып.7
37. **Кириченко, В. А.** Оценка влияния режимов электропрогрева на физико-механические свойства полистиролбетона/В.А. Кириченко// Бетон и железобетон. –1995. -№3. –С.4-5
38. **Трембицкий, С.М.** Электротермия – метод интенсификации и снижения электроемкости производства сборного железобетона. Новые

технологические разработки в производстве сборного железобетона: сб. научн. тр./С.М. Трембицкий// ВНИИ железобетон. –1990. Вып.2.

39. **Трембицкий, С.М.** Электротепловые методы интенсификации производства сборного железобетона/ С.М. Трембицкий // Бетон и железобетон. –1989. -№2.
40. **Трембицкий, С.М.** Методы и область эффективного использования электротермии в технологии сборного железобетона/ С.М. Трембицкий //Энергетическое строительство. –1987. –№2.
41. **Трембицкий, С.М.** Энерго- ресурсосбережение в заводской строительной технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций/ С.М. Трембицкий –М.: ОАО «Издательство СТРОЙИЗДАТ», –2004. –262 с.
42. **Трембицкий, С.М.** Технические и организационные основы зимнего бетонирования монолитных железобетонных конструкций с прогревом бетона/ С.М. Трембицкий // Бетон и железобетон. –2007. -№6. –С.20-24.
43. **Трембицкий, С.М.** Условия достижения высоких темпов и качества строительства зданий из монолитного железобетона/ С.М. Трембицкий, Л.Н. Беккер, П.Г. Кебадзе // Бетон и железобетон. – 2008. - №5. –С. 8-11
44. **Минаков, Ю.А.** Ряд технических средств реализации кондуктивного нагрева бетона на основе низковольтных теплоэлементов/ Ю.А. Минаков// Механизация строительства. –1994. –№2.
45. **Тихоненко, Ю.Ф.** Электронагревательные панели для термообработки строительных изделий/ Ю.Ф. Тихоненко// Промышленность строительных материалов. Москва. –1991. -№8.
46. **Зимнее** бетонирование монолитных домов. Внедрение разработки в строительство РСФСР. Научно–технический реферативный сборник РОСИНФОРМРЕСУРС., –М., –1991. –Вып. 6.
47. **Попов, Ю.А., Андриевский С.Н., Лунев Ю.В., Молодин В.В., Суханов А.С., 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.
48. **Попов, Ю.А.,** Лунев Ю.В., Молодин В.В. Управляемые режимы тепловой обработки бетона/ Ю.А. Попов, Ю.В. Лунев, В.В. Молодин // Бетон и железобетон. –2006. -№5. –С. 10-12
49. **Головнев, С. Г.** Технология зимнего бетонирования. Оптимизация параметров и выбор методов / С. Г. Головнев. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 1999.- 156 с.
50. **Опыт** обогрева стен и перекрытий в термоактивной опалубке. Каталог паспортов. Передовой производственный опыт в строительстве, рекомендованный для внедрения, –М. –1989. –Вып.2.
51. **Опыт** обогрева перекрытий термоэлектрическими матами при возведении зданий с использованием объемно–переставной опалубки. Каталог паспортов. Передовой производственный опыт в строительстве, рекомендованный для внедрения, –М. –1989. –Вып.3
52. **Кривонос А.А,** Заднепровская А.Д. Бетонирование при отрицательной температуре/ А.А. Кривонос, А.Д. Заднепровская// Шахтное строительство. –1989. -№1.
53. **Амбарцумян, С.А.** Греющая опалубка с полимерным токопроводящим покрытием/ С.А. Амбарцумян, В.Я. Гендин, Ю.Б. Гурецкий и др.// Бетон и железобетон. –1989. -№2. –С. 15-24.
54. **Прокопьев, М.В.** Индукционный нагрев термоактивной опалубки/ М.В. Прокопьев, В.Н. Ткачев// Электротехника в строительстве и ЖКХ: сб. научн. тр. РИСИ –Ростов –на– Дону. –1991.
55. **Волосян, Л.Я.** Тепло- и массообмен при термообработке бетонных и железобетонных изделий/Л.Я. Волосян. –Минск. Изд-во «Наука и техника». –1973. –256с.
56. **Маевский, В. К.** Прогрев монолитных керамзитобетонных стен элементами из электропроводного бетона/ В.К. Маевский, Г.А. Пугачев и др.// Изв. ВУЗов. Строительство. –1992. -№7–8.

57. **Францев, А. С.,** Маевский В. К., Пугачев Г. А. Влияние температурного градиента на прочность бетонов стен монолитных зданий/ А.С. Францев, В.К. Маевский, Г.А. Пугачев// Изв. ВУЗов. Строительство. –1991. -№11.
58. **Пугачев, Г.А.** Некоторые особенности вибротехнологии электропроводного бетона/Г.А. Пугачев и др.// Изв. ВУЗов, Строительство. –1994. -№2.
59. **Пугачев, Г.А.** Основы получения электропроводных бетонов с добавкой суперпластификаторов/ Г.А. Пугачев и др. // Изв. ВУЗов, Строительство. – 1994.-№4.
60. **Пугачев, Г.А.** Оптимизация состава многокомпонентных вяжущих средств для электропроводного бетона/ Г.А. Пугачев и др.// Изв. ВУЗов, Строительство. –1992. -№11,12.
61. **Пугачев, Г.А.** Электропроводный бетон на основе ВНВ. Моделирование его структуры и проводимости/ Г.А. Пугачев, Е.К. Маевский и др. //Изв. ВУЗов, Строительство. –1993. -№4.
62. **Электропроводящий бетон.** Бюллетень строительной техники, –1992. -№2.
63. **Воробьев, В.А.** Математическое моделирование электрофизических свойств электропроводящих бетонов/ В.А. Воробьев, А.В. Илюкин //Изв. ВУЗов, Строительство. –1995. -№5-6.
64. **Курилов, В. П.** Результаты натурного эксперимента по контактному электрообогреву массивной монолитной железобетонной конструкции/ В.П. Курилов, В.Т. Шупертяк, А.Я. Кацман// Строительное производство. Респ. межвед. научно-технический сборник НИИСП. – Киев, 1990. Вып.29.
65. **Ли, А. И.** Форсированный электропрогрев бетона стеновых панелей сельхоз зданий/ А.И. Ли, В.А. Шилов, Л.В. Бариллов и др.// Совершенствование технологии бетонных работ и интенсификация использования техники: сб. научн. тр. – Владимир. Владимирский политехнический институт. –1990.
66. **Крылов, Б.А.** О воздействии электрического тока на твердение бетона/ Б.А. Крылов, А.И. Ли// Бетон и железобетон. –1992. -№2. –С.7-8.

67. **Михановский, Д.С.** Электрообработка арболита в целях интенсификации процессов вызревания изделий/ Д.С. Михановский, В.П. Луняшин// Проектирование и строительство объектов агропромышленного комплекса. Серия строительные материалы и конструкции, здания и сооружения. Экспресс информация, отечественный опыт. ЦНИИЭП Сельстрой, –1988.
68. **Гендин, В.Я.** Пути снижения неравномерного распределения температуры при термообработке конструкций/ В.Я. Гендин// Бетон и железобетон. –1992. -№9. –С.13-14.
69. **Афанасьев, Н. Ф.** Технология производства изделий с непрерывным электроразогревом: автореф. дисс....на соиск. уч. степ. докт. техн. наук./ Афанасьев Николай Фирсович. –Москва, 1993. –46 с.
70. **Пшонкин, Н.Г.** Комплексная обработка бетонных смесей в транспортирующих трубах/ Н.Г. Пшонкин// Бетон и железобетон. –1992. - №11. –С.23-24.
71. **Пшонкин, Н. Г.** Непрерывный электроразогрев бетонных смесей в винтовых конвейерах/ Н.Г. Пшонкин// Изв. вузов. Строительство и архитектура. –1991. - №9. –С. 72-74.
72. **Колчеданцев, Л.М.** Интенсификация бетонных работ в условиях массового производства/ Л.М. Колчеданцев, М.П. Рощупкин// Бетон и железобетон. – 1994. -№6. –С.18-21.
73. **Арбенев, А.С.** Виброэлектробетонирование на стройплощадке/ А.С. Арбенев, М.П. Рощупкин// Бетон и железобетон. –1991. -№2. –С.19-20.
74. **Пшонкин, Н.Г.** Моделирование тепловых процессов непрерывного электротеплоразогрева потока бетонной смеси в трубах/ Н.Г. Пшонкин//Изв. ВУЗов., Строительство. –1994. -№4. –С. 53-56.
75. **Применение** электропроводящего полипропилена для комбинированной термообработки бетона. Новые полимерные строительные материалы и изделия: межвед. сб. науч. тр. МИСИ – М. 1987.

76. **Копылов, В.Д.** Эффективный способ электротеплообработки керамзитогазобетона/ В.Д. Копылов// Бетон и железобетон. –2002, -№6. –С. 17-20.
77. **Мелихов, В.И.** Энергосберегающая технология тепловой обработки полистиролбетонных изделий/ В.И. Мелихов, В.В. Девятов, В.И. Шумилин// Бетон и железобетон. -1997.-№2.- С. 17-18.
78. **Крылов, Б.А.** Трёхслойные панели с теплоизоляционным слоем из пенополистиролбетона/ Б.А. Крылов, В.А. Кириченко// Бетон и железобетон. –1994.-№3. –С.10-12.
79. **Кириченко, В.А.** Оценка влияния режимов электропрогрева на физико-механические свойства полистиролбетонов/ В.А. Кириченко //Бетон и железобетон. – 1995.-№3. –С.4-5.
80. **Кириченко, В.А.** Перспективы применения заводами ЖБИ вспученного полистирола в трёхслойных стеновых панелях/ В.А. Кириченко// Труды седьмой международной научно-практической конференции «Состояние биосферы и здоровье людей» (МК-38-7). –Пенза 2007. –С. 108-109.
81. **Кириченко, В.А.** Давление, возникающее в цементном тесте при электропрогреве полистиролбетонной смеси/ В.А. Кириченко// Труды седьмой международной научно-практической конференции «Состояние биосферы и здоровье людей» (МК-38-7), –Пенза, 2007. –С. 109-111.
82. **Кириченко, В.А.** Влияние режимов термообработки на свойства цементного камня/ В.А. Кириченко// Труды седьмой международной научно-практической конференции «Состояние биосферы и здоровье людей» (МК-38-7), –Пенза, 2007. –С. 106-107.
83. **Копылов, В.Д.** Дифференцированные режимы прогрева бетона/ В.Д. Копылов// Бетон и железобетон. –1997.- №4. –С. 12-14.
84. **Амбарцумян, С.А.** К вопросу автоматизации электротермообработки бетона монолитных конструкций / С.А. Амбарцумян, В.Я. Гендин, Ю.Б. Гурецкий и др.// Бетон и железобетон –1998.-№3. –С. 9-10.

85. **Гендин, В.Я.** Влияние деструктивных процессов при электротермообработке на прочность бетона/ В.Я. Гендин// Бетон и железобетон. –1999.-№1. –С. 6-8.
86. **Арбеньев, А.С.** Технология бетонных работ с электроразогревом в строительстве/ А.С. Арбеньев// Сб. научн. тр. Владимирский политехнический институт. –Владимир, 1990.
87. **Ваганов, С.В.** Технология получения ватиаэронового строения бетона из разогретых цементно–песчаных смесей/ С.В. Ваганов, С.Ф. Томских// Сб. научн. тр. Владимирский политехнический институт. –Владимир. 1990.
88. **Бессчастный, А.В.** Вакуумная обработка бетона/ А.В. Бессчастный// Мт Cfybpswbz enhjbutkmendf. –1993. -№1.
89. **Пшонкин, Н.Г.** Оценка эмпирических зависимостей сопротивления бетонных смесей от температуры/ Н.Г. Пшонкин // Бетон и железобетон. – 1992. -№12. –С.4-6
90. **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.
91. **Федосов, С.В.** Математическое моделирование температурно-временных зависимостей удельной проводимости бетонных смесей/ С.В. Федосов, В.И. Бобылёв, А.М. Соколов// Строительные материалы. –2009. -№9. –С. 84-85.
92. **Титов М.М.** Технология предварительного разогрева бетонной смеси с использованием современного оборудования/ М.М. Титов // Известия ВУЗов. Строительство. –2009. -№3-4. –С.56-62.
93. **Титов, М.М.** Методика электротехнического расчёта устройств для технологии электроразогрева бетонных смесей/ М.М. Титов // Вестник ТГАСУ. –2009. -№4. –С.152-161.

94. **Титов, М.М.** Режим потребления мощности и коэффициента полезного действия электроразогревающихся устройств (ЭРУ) циклического действия/ М.М. Титов //Вестник ТГАСУ. –2010. -№1. –С. 172-186.
95. **Трембицкий, С.М.** и др. Электротехнология термообработки железобетонных напорных труб/ С.М. Трембицкий и др.// Энергетическое строительство. –1989. -№2.
96. **Богомолов, О.В.** Энергосберегающие тепловые центры для предприятий изготовителей бетонных и железобетонных изделий/ О.В. Богомолов // Технология бетонов. –2009. -№3. –С. 40.
97. **Лобацевич, К.Л.** Объединённая модель электротермического процесса/ К.Л. Лобацевич, А.В. Юдин // Вестник РГАТА. –2010. -№1. –С. 157-162.
98. **Федосов, С.В.** Электротепловая обработка бетона токами различной частоты/ С.В. Федосов, В.И. Бобылев, Ю.А. Митькин, А.М. Соколов, Г.Н. Закинчак// Строительные материалы. –2010. -№ 6 . – С. 4-7.
99. **Федосов С.В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Монография – Иваново: ИПК «ПрессСто», 2010. – 364 с.
100. **Федосов С.В.** Электротепловая обработка бетона токами повышенной частоты на предприятиях сборного бетона/ Федосов С.В., Бобылев В.И., Соколов А.М. Монография. Иваново: ФГБОУ ВО «ИГЭУ им. В.И. Ленина», ИВГПУ, 2016. – 336 с.
101. **Бобылёв В.И.** Научная интуиция+электрификация строительной отрасли/ Бобылев В.И., Соколов А.М.// Разработка машин и агрегатов, исследование тепломассообменных процессов в технологиях производства и эксплуатации строительных материалов и изделий. СБОРНИК ТРУДОВ. МАТЕРИАЛЫ КРУГЛОГО СТОЛА, ПОСВЯЩЕННОГО НАУЧНОЙ ШКОЛЕ АКАДЕМИКА РААСН, Д.Т.Н., ПРОФЕССОРА ФЕДОСОВА С.В. ИВГПУ, Иваново. 2013. С.52-55
102. **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. –2013. –№ 3. –С. 54-57.

103. **Федосов, С.В.** Состояние и перспективы применения электротепловой обработки строительных материалов и изделий токами повышенной частоты/ Федосов С.В., Красносельских Н.В., Кузнецов А.Н., Соколов А.М.// Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений, посвященных 105-летию академика А.В. Лыкова. 2015. С. 291-299
104. **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.
105. **Федосов С.В., Акулова М.В., Кокшаров С.А., Метелева О.В.** Теоретические основы тепломассопереноса в перспективных технологиях производства материалов текстильной и строительной отраслей промышленности// Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. № 6. С. 170-175.
106. **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.
107. **Федосов, С.В.** Нестационарный тепло- и массоперенос в многослойных ограждающих конструкциях/ С.В. Федосов, А.М. Ибрагимов// Строительные материалы. –2006. -№4. –С. 86-87.
108. **Федосов, С.В.** Моделирование прогрева стеновых панелей при термической обработке/ С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева и др.//Строительные материалы. –2007. -№2. –С. 86-87.

109. **Алоян, Р.М.** Моделирование теплового состояния материала при протекании в нём экзотермической реакции / Р.М. Алоян, М.Е. Лебедев, Н.В. Виноградова// Строительные материалы. -2007. -№9. -С. 74-75.
110. **Алоян, Р.М.** Моделирование термической обработки материала перемещающимся источником теплоты при протекании эндотермической реакции /Алоян Р.М., Виноградова Н.В., Лебедев М.Е.// Строительные материалы. –2007. -№10. –С. 68-69.
111. **Федосов С.В.,** Бобылёв В.И., Ибрагимов А.М., Козлова В.К., Соколов А.М. Сокольский А.И. Математическое моделирование процесса набора прочности бетоном при электротепловой обработке// Строительные материалы. № 4, 2012 г. С. 36-41.
112. **Федосов С.В.,** Бобылёв В.И., Ибрагимов А.М., Соколов А.М. Методика расчёта предельных температурных градиентов в железобетонных изделиях в процессе электротепловой обработки// Строительные материалы. №3, 2011 г. С. 44-46
113. **Федосов С.В.,** Красносельских Н.В., Кузнецов А.Н., Соколов А.М. О возможности управления температурным полем в объеме вещества при его термической обработке воздействием электрического поля// Academia. Архитектура и строительство. № 4, 2015. С. 129-132
114. **Баженов Ю.М.,** Федосов С.В. , А.Н.Кузнецов А.Н., Соколов А.М. Температурные характеристики тепловой и электротепловой обработки при безопалубочной технологии изготовления длинномерных железобетонных изделий// Academia, Архитектура и строительство. №4, 2012, с. 101-105
115. **Мацкевич С.М.,** Решение двумерных задач теплопроводности дискретно-аналитическим методом / С.М. Мацкевич. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering / Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. – Volume 11, Issue 3. – 2015. – pp. 21-28

116. **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
117. **Лыков А.В.** Теплообмен: (Справочник). 2-е изд., перераб. и доп. – М. Энергия, 1978. 480 с.
118. **Нейман Л.Р.** Теоретические основы электротехники/ Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян. – М., –Л.: Энергия, 1966. –407 с.
119. **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.
120. **Федосов, С.В., Крылов Б.А., Бобылёв В.И., Пыжиков А.Г., Красносельских Н.В., Соколов А.М.** Применение электротепловой обработки железобетонных изделий на полигонных установках// *Строительные материалы*. 2013. №11. С. 35-39
121. **Федосов, С.В., Красносельских Н.В., Коровин Е.В., Соколов А.М.** Электротепловая обработка железобетонных изделий токами повышенной частоты в условиях малых предприятий// *Строительные материалы*. 2014. №5. С. 8-14
122. **Красносельских, Н.В.** Разработка методики проведения экспериментов и оборудования для исследования характеристик электротепловой обработки изделий из тяжелых и ячеистых бетонов / С.В. Федосов, Н.В. Красносельских, 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). ИВГПУ. Иваново. 2017. С. 504-506
123. **Красносельских, Н.В.** Комплексные исследования процессов электротепловой (электротермической) обработки токами повышенной частоты в производственных условиях / С.В. Федосов,

- Н.В. Красносельских, А.М. Соколов // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК-2018). Сборник материалов межвузовской (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции. ИВГПУ. Иваново.2018. С. 326-327
124. **Красносельских, Н.В.** Оценка показателей энергетической эффективности электротехнологической установки и процесса электротепловой обработки бетона / С.В. Федосов, Н.В. Красносельских, Т.Е. Шадриков, А.М. Соколов // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (18 Бенардосовские чтения) Иваново, 2015. С. 128-131
125. **Красносельских, Н.В.** Особенности электротепловой обработки тонкостенных объемных железобетонных изделий / С.В. Федосов, Н.В. Красносельских, А.М. Соколов // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК). Сборник материалов межвузовской на-учно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием). ИВГПУ. Иваново. 2015. С. 298-299
126. **Красносельских, Н.В.** Оценка параметров энергоэффективной установки для электротепловой обработки тонкостенного железобетонного изделия индукционным методом / Н.В. Красносельских, Абель Танкой, В.А. Котов, А.М. Соколов // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК-2018). Сборник материалов межвузовской (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции. ИВГПУ. Иваново.2018. С. 324-325
127. **Мелешин, В.И.** Транзисторная преобразовательная техника, Москва: Техносфера, 2005. – 632 с. ISBN 5-94836-051-2
128. **Красносельских, Н.В.** Лабораторная установка для экспериментальных исследований тепловой обработки материалов и изделий токами повышенной частоты / С.В. Федосов, Н.В. Красносельских, А.Н. Кузнецов, Д.В. Лакеев, Абель Танкой, А.М. Соколов // Изв.вузов. Технология текстильной промышленности. 2017. № 3. С 241-245

129. **Гусенков, А.В.,** Лебедев В.Д., Соколов А.М., Шадриков Т.Е. Страхов А.С. Особенности применения частотного анализа при расчете электрических цепей с транзисторными преобразователями напряжения// Электричество. 2016. № 1. С. 4-12.
130. **Красносельских, Н.В.** О возможности экспериментального исследования электрических полей в объеме материала при электротепловой обработке бетонных изделий электродным методом / С.В. Федосов, Н.В. Красносельских, А.Н. Кузнецов, А.М. Соколов // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК-2018). Сборник материалов межвузовской (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции. ИВГПУ. Иваново. 2018. С. 310-312
131. **Гусенков А.В.** Показатели энергетической эффективности высоковольтного электротехнического комплекса повышенной частоты/ Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Соколов А.М., Шадриков Т.Е., Танкой Абель, Бачурина А.Д.// Энергетик. 2017. №7. С.6-12.
132. **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.
133. **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.
134. **Козлова, В.К.** Продукты гидратации кальциево-силикатных фаз цемента и смешанных вяжущих веществ/ В.К. Козлова, Ю.А. Ильевский, Ю.В. Карпова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ. 2005. –183 с.
135. **Мацкевич С.М.** Численно-аналитическое решение нестационарной задачи теплопроводности в строительных конструкциях. Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М. 2015. 195 с.

136. Федосов С.В., Кузнецов А.Н., Соколов А.М. Методика расчётной оценки характеристик температурных полей в объёме материала при автоклавной обработке ячеистых бетонов// Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК). Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием). ИВГПУ. Иваново.2015. С. 258-260
137. **Красносельских, Н.В.** К вопросу о методике расчета температурных характеристик при термическом воздействии электромагнитного поля на металлические материалы / С.В. Федосов, Н.В. Красносельских, Д.В. Лакеев, А.М. Соколов // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК). Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием). ИВГПУ. Иваново. 2016. С. 298-299
138. **Грызлов В.С.,** Меньшикова Е.В. Элементы термодинамики бетона. Череповец: Изд-во ГОУ ВПО ЧГУ, 2005. – 169 с.
139. **Красносельских, Н.В.** Разработка методики экспериментального исследования температурных характеристик индукционного нагрева плоской стальной поверхности / Н.В. Красносельских, Д.В. Лакеев, Абель Танкой, А.М. Соколов // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК). Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием). ИВГПУ. Иваново. 2017. С. 269-271

ПРИЛОЖЕНИЕ



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Красносельских Николая Валериевича

Настоящим актом подтверждается, что на основе результатов, полученных соискателем Красносельских Н.В. в рамках диссертационных исследований, а именно на основе дальнейшего совершенствования методологии создания и применения процессов электротепловой (электротермической) обработки железобетонных изделий токами повышенной частоты с применением источников питания на основе полупроводниковых преобразователей напряжения разработана конструкция опытно-промышленных установок для изготовления различных железобетонных изделий с помощью такой обработки. Проведены испытания разработанных и изготовленных опытно-промышленных установок в производственных условиях. Выполнены исследования характеристик процессов электротепловой обработки токами повышенной частоты при изготовлении различных железобетонных изделий.

Результаты диссертационной работы учтены при составлении перспективных планов развития, модернизации и технического перевооружения Ивановской домостроительной компании. Предложенные в работе расчетные методы используются при разработке нового и высокоэффективного технологического оборудования.

Директор по производству
ОАО Ивановская ДСК

Добров А.С.

Начальник Цеха №5
ОАО Ивановская ДСК

Мясников А.А.