

05.23.08

M482

На правах рукописи



**МЕЛЬНИК АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНВЕКТИВНОГО ПРОГРЕВА  
МОНОЛИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Специальность 05.23.08 – «Технология и организация строительства»**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**



**Челябинск – 2002**

Работа выполнена на кафедре «Технология строительного производства» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент РААСН Головнев С.Г.

Научный консультант – кандидат технических наук,  
доцент Коваль С.Б.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
советник РААСН Одинцов Д.Г.;  
кандидат технических наук,  
доцент Муштаков М.И.

Ведущая организация – ЗАО «Монолит»  
г. Челябинск

Защита состоится «17» декабря 2002 г. в 15 часов, на заседании диссертационного совета ДМ 212.298.08 Южно-Уральского государственного университета по адресу: г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «  » \_\_\_\_\_ 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор технических наук, профессор  Трофимов Б.Я.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность работы

В последние годы в России наметилась тенденция роста применения монолитного бетона в гражданском строительстве. При этом до 40 % общего объема работ в строительстве выполняется в зимних условиях. Значительная часть (до 65%) монолитных железобетонных конструкций жилых и общественных зданий являются тонкостенными (плиты перекрытий, стены с модулем поверхности  $M_p > 10$ ). Однако большинство существующих методов тепловой обработки бетона были разработаны в основном для массивных конструкций промышленных зданий, поэтому становится актуальным вопрос о выборе способа и определении параметров прогрева стен и перекрытий гражданских зданий.

Одним из наиболее распространенных методов, применяемых для термообработки бетона тонкостенных конструкций, является метод конвективного прогрева, при котором в помещение, ограниченное монолитными стенами и перекрытиями подают нагретый воздух. Преимущества конвективного прогрева заключаются в универсальности использования, низкой трудоемкости, возможности комбинирования с другими методами зимнего бетонирования. Однако область применения метода ограничена отсутствием научно-методических рекомендаций, посвященных вопросам расчета параметров конвективного прогрева. Выбор параметров термообработки на основании лишь эмпирического опыта связан с увеличением периода выдерживания конструкций, с перерасходом электроэнергии, с риском возникновения в бетоне участков с отрицательной температурой. Кроме того, малоизученными остаются вопросы, касающиеся повышения эффективности теплопередачи за счет усовершенствования способов подвода тепловой энергии к бетону. Следовательно, для снижения энергетических затрат и уменьшения продолжительности термообработки необходимы исследования, направленные на научно-теоретическое обоснование выбора параметров конвективного прогрева, а также усовершенствование способа подведения теплого воздушного потока к конструкциям.

Важным условием качественного возведения монолитных конструкций в зимний период является исключение деструктивных процессов в бетоне. Однако в практике зимнего бетонирования зачастую существует вероятность замораживания бетона в зоне соприкосновения с ранее уложенным и набравшим прочность бетоном. В связи с этим необходимо провести исследования и разработать рекомендации по уменьшению сброса прочности бетона при воздействии отрицательных температур в ранней стадии его твердения.

Целью диссертационной работы является разработка научно обоснованной технологии конвективного прогрева монолитных тонкостенных конструкций, направленной на уменьшение энергетических затрат, сокращение продолжительности термообработки и обеспечение требуемого качества строительной продукции.

Для достижения этой цели необходимо провести исследования и решить ряд теоретических и практических задач:

- провести анализ методов конвективного прогрева, дать их классификацию и разработать предложения по совершенствованию этих методов;
- исследовать распределение температуры и прочности в реальных конструкциях при различных методах конвективного прогрева, установить особенности формирования температурных полей в бетоне конструкций; выявить преимущества и недостатки методов;
- исследовать влияние на прочность бетона, подвергнувшегося замораживанию в раннем возрасте, его состава и параметров последующей термообработки;
- уточнить методику расчета параметров теплогенератора;
- разработать математическую модель трехмерного нестационарного температурного поля, позволяющую выполнить расчет температуры в бетоне конструкций;
- разработать технологический регламент конвективного прогрева монолитных тонкостенных конструкций на основании расчета температуры и прочности бетона;
- осуществить внедрение усовершенствованного метода конвективного прогрева и оценить технико-экономическую эффективность его использования.

#### **Научная новизна работы:**

- ✓ произведена классификация методов конвективного прогрева по принципу подведения теплового потока; предложен метод конвективного прогрева, позволяющий снизить энергозатраты и сократить продолжительность термообработки;
- ✓ установлены особенности формирования температурных полей в бетоне конструкций при различных методах конвективного прогрева;
- ✓ выявлено влияние параметров термообработки, состава бетона на его прочность после раннего замораживания;
- ✓ разработана методика выбора параметров конвективного прогрева, включающая: расчет параметров теплогенератора, определение температуры в приопалубочном пространстве, вычисление температуры и прочности бетона конструкции через различные периоды термообработки.

#### **Практическая значимость:**

- составлены программы для расчета на ЭВМ параметров термообработки бетона монолитных конструкций;
- разработан «Технологический регламент конвективного прогрева монолитных тонкостенных конструкций».

#### **Внедрение результатов**

Усовершенствованный метод конвективного прогрева применен строительной фирмой ЗАО «Монолит» при возведении каркасов 6-этажного жилого дома по ул. Гагарина, 9-этажного жилого дома по ул. Энгельса, 20-квартирного жилого дома в 8-м микрорайоне в г. Челябинске. Предложенная методика выбора теплогенератора, программы по расчету температурных и прочностных полей использованы при составлении технологических карт производственным отделом ООО «Инкострой» г. Челябинск. На основании материалов исследований разработан «Технологи-

ческий регламент конвективного прогрева монолитных тонкостенных конструкций».

### **Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались на ежегодных научно-технических конференциях в Южно-Уральском государственном университете в 1999 – 2002 гг., на научно-технической конференции «Инженерная защита окружающей среды в транспортном строительстве» 3-4 апреля 2002 г. в г. Челябинске.

**Достоверность** экспериментальных данных, полученных аналитических выражений и зависимостей, разработанных расчетных алгоритмов и выводов подтверждается достаточным количеством проведенных экспериментов, использованием поверенного оборудования и стандартных методик, выбором адекватных математических моделей, применением современных методов математической обработки результатов исследований, сопоставлением данных рассчитанных на ЭВМ с результатами экспериментов, выполненных в натуральных условиях на реальных конструкциях.

### **Публикации**

Основные положения диссертации изложены в 4 печатных работах.

### **Объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти разделов и основных выводов, приложения, списка использованной литературы, 15 таблиц и 61 рисунка. Список литературы включает 110 наименований. Общий объем диссертации 176 с., в том числе 25 с. приложений.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и задачи исследований.

**В первой главе** диссертации приведен обзор литературных источников, в котором в соответствии с поставленной целью дан анализ современного состояния технологии зимнего бетонирования. При этом отмечено, что большое значение для развития этой области науки имеют работы ученых: Афанасьева А.А., Арбеньева А.С., Ахвердова И.Н., Богословского В.Н., Гныри А.И., Головнева С.Г., Заседателя И.Б., Киреенко И.А., Красновского Б.М., Лагойды А.В., Крылова Б.А., Лукьянова В.С., Малининой Л.А., Миронова С.А., Рамачандрана Р.Ф., Скрамтаева Б.Г. и др.

Анализ методов зимнего бетонирования монолитных тонкостенных конструкций показал, что для их прогрева следует применять методы активной термообработки. В монолитном домостроении с использованием опалубки, позволяющей создавать замкнутые объемы (тоннельная опалубка), применение активных способов термообработки более целесообразно, так как в тепловом контуре по-

вышается эффективность передачи тепловой энергии от теплогенератора к бетонируемым конструкциям. Поэтому в практике зимнего бетонирования используется конвективный способ прогрева тонкостенных монолитных конструкций. При этом методе открытые вертикальные поверхности тоннеля закрываются теплоизолирующими шторами. В образованный таким способом замкнутый объем устанавливают теплогенераторы. Передача тепла от теплогенератора к поверхности опалубки осуществляется конвекцией. Далее за счет теплопроводности бетона происходит нагрев внутренних слоев возводимой конструкции. Наружные опалубочные щиты утепляются эффективными теплоизолирующими материалами, либо используются термоактивные маты.

Методы конвективного прогрева можно классифицировать по принципу подведения теплового потока к прогреваемой конструкции. Исходя из этого, можно выделить следующие методы: «традиционный» камерный прогрев, «камерный прогрев с воздуховодами», «конвективный прогрев с приопалубочными шторами».

При «традиционном» камерном прогреве тепловой поток от теплогенератора подается в замкнутый объем тоннеля и далее, вследствие конвективного теплообмена, происходит нагревание внутренних опалубочных щитов (рис.1). Согласно публикациям в научной литературе существенным недостатком метода «традиционного» камерного прогрева является неравномерное распределение температуры по площади конструкций стен и, вследствие этого, вероятность промораживания их отдельных участков, что согласно требованиям строительных норм не допускается. Поэтому необходимо разработать технологические мероприятия, проведение которых позволит избежать деструктивного влияния отрицательной температуры в неблагоприятных для прогрева участках конструкций.

«Камерный прогрев с воздуховодами». Сущность метода заключается в том, что тепловой поток от теплогенератора поступает в распределитель и далее в воздуховоды, подающие тепловой поток по периметру возводимых конструкций стен (рис.2). Применение данного метода снижает вероятность замораживания отдельных участков конструкций, так как распространение тепла в тоннеле осуществляется более равномерно, чем при использовании «традиционного» камерного прогрева. Однако в практике зимнего бетонирования этот метод встречается редко.

«Конвективный прогрев с приопалубочными шторами» был разработан автором совместно с сотрудниками кафедры «Технология строительного производства» Южно-Уральского государственного университета. Метод основан на передаче теплового потока от теплогенератора в область, ограниченную теплоизолирующей шторой и щитами опалубки (рис. 3). Преимущество этого метода заключается в уменьшении объема прогреваемого пространства, граничащего с опалубкой, и в повышении эффективности передачи тепла бетону. Предложенный метод заявлен на получение патента Российской Федерации на изобретение.

Генераторами тепла для конвективного прогрева чаще всего служат электрокалориферы, так как они отличаются простотой установки, высоким КПД, низкой стоимостью, возможностью быстрой замены в случае выхода из строя и высокой степенью безопасности обслуживающего персонала. Существующие ме-

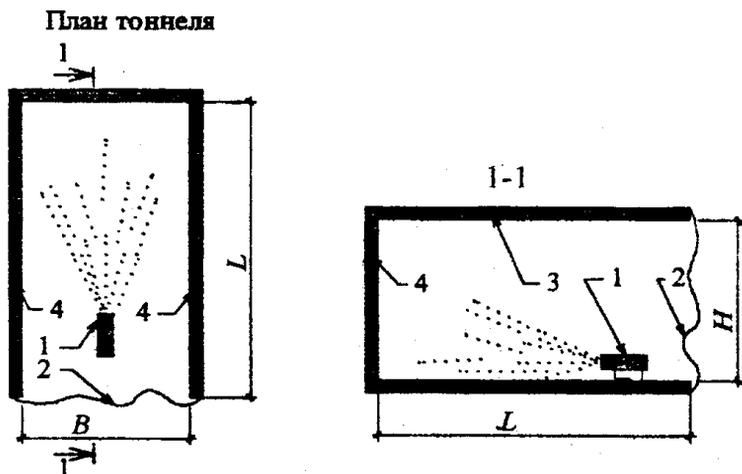


Рис. 1. Схема «традиционного» камерного прогрева:  
 1—теплогенератор; 2—теплоизолирующая штора;  
 3—перекрытие; 4—стены

тодики выбора теплогенераторов в зависимости от условий производства работ в основном являются приближенными. Так, согласно «Рекомендациям по обеспечению трещиностойкости монолитных стен», выбор мощности воздушонагревателя ориентировочно можно производить из расчета  $250 \text{ Вт/м}^2$  опалубки при двустороннем обогреве и  $500 \text{ Вт/м}^2$  при одностороннем. Но данная методика не учитывает условия теплообмена и ряд технологических факторов: толщину возводимых

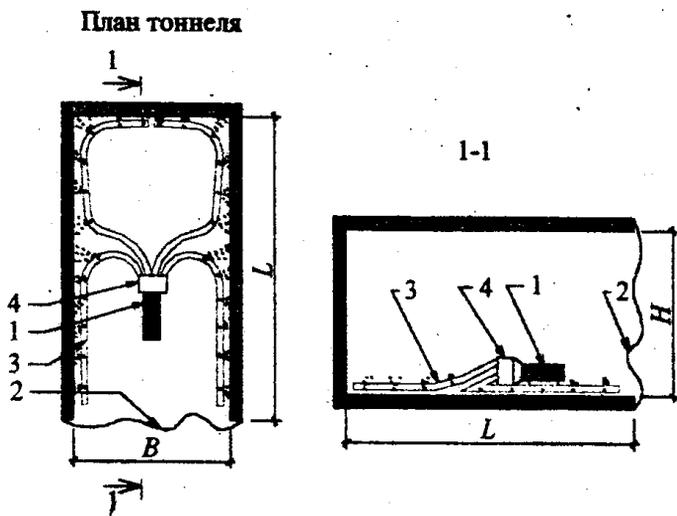


Рис. 2. Схема «камерного прогрева с воздуховодами»:  
 1—теплогенератор; 2—теплоизолирующая штора;  
 3—воздуховоды; 4—распределитель воздушного потока

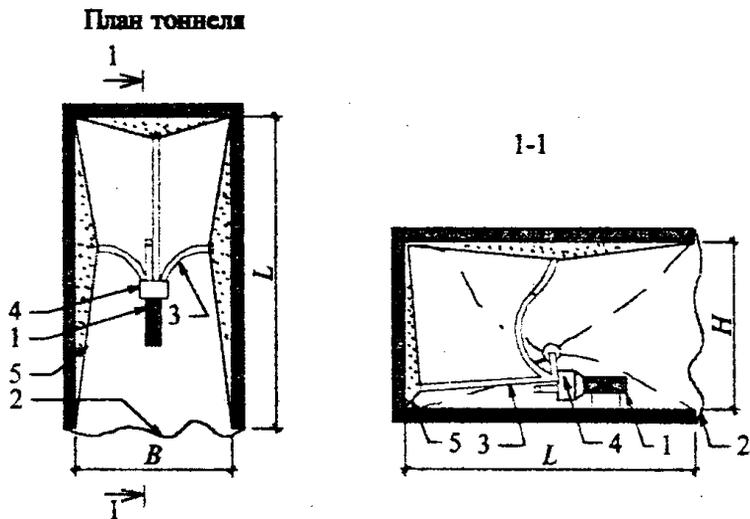


Рис. 3. Схема «конвективного прогрева с приопалубочными шторами»:

1—теплогенератор; 2—теплоизолирующая штора; 3—воздуховоды;

4—распределитель воздушного потока; 5—приопалубочные шторы

конструкций; температуру наружного воздуха; скорость ветра; теплофизические параметры опалубочных щитов и теплоизолирующей шторы; потери на нагрев инфильтрующегося воздуха. В связи с этим необходимо разработать методику расчета параметров теплогенератора, позволяющую осуществить выбор прогревочного оборудования при заданных климатических и технологических условиях.

Для разработки рекомендаций по использованию методов конвективного прогрева, выявления их преимуществ и недостатков необходимо исследовать распределение температуры и прочности в бетоне конструкций, термообработка которых осуществляется этими методами.

Во второй главе приведены результаты исследований распределения температуры и прочности в бетоне монолитных тонкостенных конструкций при различных вариантах конвективного прогрева: «традиционном» камерном прогреве, «камерном прогреве с воздуховодами» и «конвективном прогреве с приопалубочными шторами».

Исследования проводили в климатических условиях г. Челябинска на конструкциях стен и перекрытий монолитных железобетонных ячеек размером в плане  $L \times B = 6,0 \times 4,5$  м, высотой  $H = 3,3$  м (рис. 1, 2, 3). Толщина прогреваемых конструкций стен, перекрытий была равна 160 мм (класс бетона В25, процент армирования стен не превышал 1%, перекрытий — 1,5%).

При возведении конструкций была применена тоннельная опалубка. В качестве источника тепла использовали электрокалорифер.

Исходя из требований прочности, регламентируемых строительными нормами, был назначен период термообработки исследуемых монолитных конструкций, его значение составило 90 часов.

Температура воздуха за время наблюдений изменялась от минус 16 до минус 22°C. Скорость ветра изменялась на интервале от 1 до 8 м/с.

«Традиционный» камерный прогрев. По результатам наблюдений были построены графики распределения температуры по внутренней грани стены (рис. 4 а) и перекрытия (рис.4 б).

Анализ полученных температурных полей позволяет сделать следующие заключения: за время термообработки колебания температуры в бетоне стен составили от минус 12 до +23°C, в бетоне перекрытий от +15 до +29°C, средние значения температуры бетона за период выдерживания составили для стены +13°C, для перекрытия +22°C.

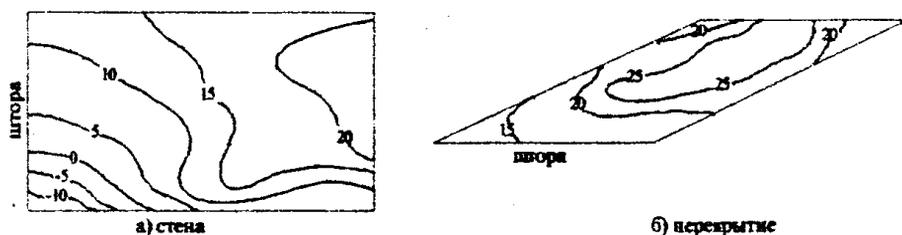


Рис. 4. Графики распределения температуры по внутренней грани конструкций, °С, через 24 часа после начала «традиционного» камерного прогрева

В ходе эксперимента установлено, что в нижней части стены у входа в тоннель через 4 часа после укладки появляется зона с отрицательной температурой бетона (-10°C). Максимальные значения температуры бетона зафиксированы: +23°C в верхней части стены, наиболее удаленной от входа в тоннель, +29°C в центральной части перекрытия.

На основании полученных значений температуры в конструкции согласно методике, разработанной Головневым С.Г., была определена прочность бетона на момент окончания изотермического выдерживания, через 90 часов после начала прогрева, ее средние значения составили для стен 48%  $R_{28}$  (при колебаниях от 25 до 57%  $R_{28}$ ), для перекрытий 61%  $R_{28}$  (при колебаниях от 49 до 64%  $R_{28}$ ).

«Камерный прогрев с воздуховодами». Анализ графиков распределения температуры в стене (рис. 5 а) и перекрытии (рис.5 б) показал, что за время прогрева температура бетона изменялась в стене на интервале от +11 до +22°C, в перекрытии от +15 до +24°C, средние значения температуры бетона за период выдерживания составили для стены +17°C, для перекрытия +20°C.

Во время наблюдений температура во всех участках бетона стены была положительной, однако, как и при использовании предыдущего метода термообработки, минимальная температура бетона (+11°C) отмечена в нижней части стены. Наибольшие значения температуры бетона зафиксированы: +23°C на участке стены, в зоне подачи на опалубку горячих струй из воздуховодов; +21°C в центральной части перекрытия.

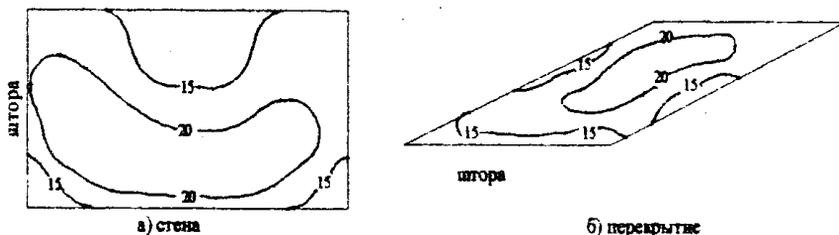


Рис. 5. Графики распределения температуры по внутренней грани конструкций, °С, через 24 часа после начала «камерного прогрева с воздуховодами»

Через 90 часов после начала прогрева, средние значения прочности бетона стен составили 55%  $R_{28}$  (при колебаниях от 45 до 65%  $R_{28}$ ), бетона перекрытий 58%  $R_{28}$  (при колебаниях от 53 до 65%  $R_{28}$ ).

«Конвективный прогрев с приопалубочными шторами». Анализ полученных температурных полей показал, что термообработка монолитных конструкций с применением приопалубочных штор характеризуется более высокими температурами прогрева, чем у предыдущих двух методов. Температуры в бетоне стен (рис. 6 а) изменялась от +16 до +37°C, в бетоне перекрытий (рис. 6 б) от +18 до +36°C. Средние значения температуры бетона стен и перекрытий за время выдерживания составили +30°C.

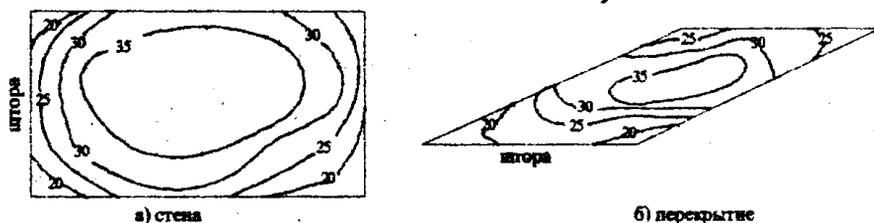


Рис. 6. Графики распределения температуры по внутренней грани конструкций, °С, через 24 часа после начала «конвективного прогрева с приопалубочными шторами»

Максимальная температура в бетоне +37°C зафиксирована в центральных зонах стены и перекрытия, в местах присоединения воздуховодов к приопалубочным шторам. Минимальная температура в бетоне +18°C отмечена на периферии конструкций. Средние значения прочности бетона стен и перекрытий через 90 ча-

сов после начала термообработки составили 70%  $R_{28}$  (при колебаниях от 62 до 75%  $R_{28}$ ).

Сопоставив полученные значения прочности бетона стен и перекрытий при различных методах конвективного прогрева, необходимо отметить, что «конвективный прогрев с приопалубочными шторами» характеризуется более высоким темпом нарастания прочности (средняя прочность в бетоне стен, перекрытий 70%  $R_{28}$ ), по сравнению с методами «традиционного» камерного прогрева (стены 48 %, перекрытия 61%  $R_{28}$ ), «камерного прогрева с воздуховодами» (стены 55%, перекрытия 58%  $R_{28}$ ). Использование «конвективного прогрева с приопалубочными шторами» позволяет сократить сроки термообработки до 20%. Кроме того, применение «конвективного прогрева с приопалубочными шторами» и «камерного прогрева с воздуховодами» в отличие от «традиционного» камерного прогрева позволяет получить более равномерное распределение температуры по площади конструкций стен.

Следует заметить, что распределение температуры исследовалось в бетоне конструкций, процент армирования которых не превышал 1,5%, с увеличением процента армирования, при термообработке «традиционным» камерным прогревом, формирование температурных полей по площади конструкций будет происходить более равномерно, так как с увеличением количества арматуры увеличивается и теплопроводность железобетона.

Проведенные исследования показали, что при температуре наружного воздуха ниже минус 22°C «традиционный» камерный прогрев не исключает замораживания бетона в нижней части стены в зоне соприкосновения с ранее уложенным бетоном предыдущего этажа. Полученные данные согласуются с результатами исследований, проведенных в Томском государственном архитектурно-строительном университете: при температуре наружного воздуха минус 20°C температура в бетоне нижней части стены составила минус 10°C.

Таким образом, при температуре наружного воздуха ниже минус 22°C при «традиционном» камерном прогреве возникает вопрос об увеличении прочности бетона, подвергшегося раннему замораживанию. Решением этого вопроса может служить последующая тепловая обработка бетона.

Ведущими учеными в области зимнего бетонирования Киреенко И.А., Мироновым С.А., Ахвердовым И.Н. отмечено положительное влияние на прочность бетона его кратковременного выдерживания при отрицательных температурах перед термообработкой. Однако данные о влиянии на прочность бетона его продолжительного замораживания перед термообработкой отсутствуют. В связи с этим была выдвинута гипотеза о том, что выбор состава бетона и параметров термообработки позволяет уменьшить сброс его прочности после замораживания в раннем возрасте.

Третья глава посвящена исследованиям влияния параметров термообработки, водоцементного отношения, пластифицирующей добавки на прочность бетона, подвергшегося замораживанию в раннем возрасте.

Для проведения исследований из бетонной смеси изготавливали образцы-кубы размером  $100 \times 100 \times 100$  мм. После изготовления, уплотнения и герметизации металлические формы с бетоном подвергались замораживанию при температуре минус  $10^{\circ}\text{C}$ , термообработке и нормальному хранению. Водоцементное отношение изменяли от 0,42 до 0,59 (бетоны, применяемые в монолитном домостроении Южного Урала). Время замораживания образцов варьировали от 24 до 72 часов. Согласно проведенным в ЮУрГУ исследованиям нарастание прочности бетона при температурах до минус  $13^{\circ}\text{C}$  протекает наиболее интенсивно в этот период. Время термообработки изменяли от 24 до 72 часов, температуру термообработки от 40 до  $60^{\circ}\text{C}$ .

Для обеспечения удобоукладываемости бетонной смеси использовали пластифицирующую добавку ЛСТ в количестве 0,2% от массы цемента (аналогично составу бетона конструкций стен при проведении натурных исследований).

На основании анализа результатов экспериментов установлено, что с увеличением водоцементного отношения эффективность термообработки после замораживания снижается. Значение прочности бетонных образцов после замораживания, термообработки, нормального хранения в зависимости от варьируемых параметров изменяется на интервале 78-100% от  $R_{28}$  для бетона с В/Ц=0,42, 74-81%  $R_{28}$  для бетона с В/Ц=0,50, 69-76%  $R_{28}$  для бетона с В/Ц=0,59. С увеличением водоцементного отношения уменьшается прочность бетона после замораживания и нормального хранения (в среднем 74%  $R_{28}$  при В/Ц=0,42; 71%  $R_{28}$  при В/Ц=0,50; 66%  $R_{28}$  при В/Ц=0,59) и прочность после замораживания, термообработки, нормального хранения (в среднем 90%  $R_{28}$  при В/Ц=0,42; 80%  $R_{28}$  при В/Ц=0,50; 74%  $R_{28}$  при В/Ц=0,59). Таким образом, наибольшее значение прироста прочности за счет термообработки (в среднем 16%  $R_{28}$ ) отмечено у бетона с наименьшим В/Ц=0,42, наименьшее (в среднем 8%  $R_{28}$ ) у бетона с наибольшим В/Ц=0,59.

Бетонные образцы, подвергшиеся термообработке после замораживания в раннем возрасте и не содержащие в составе пластифицирующей добавки, показали снижение прочности до 8% относительно бетонных образцов с ЛСТ. Пластифицирующая добавка ЛСТ замедляет процесс гидратации затворенного водой цемента на начальной стадии твердения. Поэтому в период снижения температуры в бетоне до отрицательных значений (3-4 часа после изготовления) в бетоне с добавкой кристаллогидратных образований формируется меньше, по сравнению с бетоном без добавки. Фазовый переход воды в лед сопровождается ее расширением и разрушением новообразований. После оттаивания при проведении термообработки процесс гидратации возобновляется. В местах разрушившихся новообразований вероятно возникновение структурных нарушений. Поскольку в бетоне без пластифицирующей добавки на момент замораживания содержится большее количество структурных образований, то количество структурных нарушений после оттаивания будет большим.

Из вышесказанного следует, что наиболее эффективно использование термообработки после замораживания в раннем возрасте для бетонов с малым водоцементным отношением, имеющих в составе пластифицирующие добавки.

Поскольку термообработка после замораживания бетона с  $V/D=0,42$  позволяет уменьшить сброс прочности бетона, а в ряде случаев и достигнуть марочной прочности, то для бетона этого состава на основании математической обработки результатов были получены следующие уравнения регрессии:

$$R_{\text{ЗМ,Т.О.}} = -266,4 + 1,27 \cdot \tau_{\text{ЗМ}} + 2,975 \cdot \tau_{\text{Т.О.}} + 7,86 \cdot t_{\text{Т.О.}} - 0,02542 \cdot \tau_{\text{ЗМ}} \cdot t_{\text{Т.О.}} - 0,01771 \cdot \tau_{\text{Т.О.}}^2 - 0,01083 \cdot \tau_{\text{Т.О.}} \cdot t_{\text{Т.О.}} - 0,052 \cdot t_{\text{Т.О.}}^2; \quad (1)$$

$$R_{\text{ЗМ,Т.О.,Н.Х.}} = 31,6 + 0,752 \cdot \tau_{\text{ЗМ}} + 0,804 \cdot \tau_{\text{Т.О.}} + 0,850 \cdot t_{\text{Т.О.}} - 0,01771 \cdot \tau_{\text{ЗМ}} \cdot t_{\text{Т.О.}} - 0,00608 \cdot \tau_{\text{Т.О.}}^2; \quad (2)$$

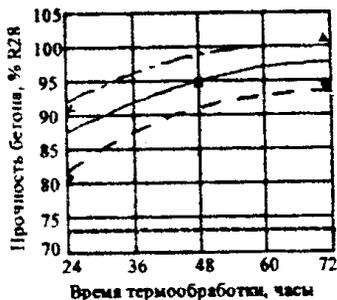
$$\Delta R_{\text{Н.Х.}} = 300,1 - 0,529 \cdot \tau_{\text{ЗМ}} - 2,238 \cdot \tau_{\text{Т.О.}} - 7,02 \cdot t_{\text{Т.О.}} + 0,00792 \cdot \tau_{\text{ЗМ}} \cdot t_{\text{Т.О.}} + 0,01083 \cdot \tau_{\text{Т.О.}} \cdot t_{\text{Т.О.}} + 0,01233 \cdot \tau_{\text{Т.О.}}^2 + 0,052 \cdot t_{\text{Т.О.}}^2, \quad (3)$$

где  $R_{\text{ЗМ,Т.О.}}$ ,  $R_{\text{ЗМ,Т.О.,Н.Х.}}$  — соответственно прочность после замораживания, термообработки и прочность после замораживания, термообработки, нормального хранения %  $R_{28}$ ;  $\Delta R_{\text{Н.Х.}}$  — прирост прочности за время нормального хранения после замораживания и термообработки, %  $R_{28}$ ;  $\tau_{\text{ЗМ}}$  — время замораживания от 24 до 72 часов;  $\tau_{\text{Т.О.}}$  — время термообработки, от 24 до 72 часов;  $t_{\text{Т.О.}}$  — температура термообработки, от 40 до 60°C.

На рис. 7 представлены графики нарастания прочности бетона после замораживания в раннем возрасте, последующей термообработки и 28 суток нормального хранения.

Анализ графиков, представленных на рис. 7 показал: при наименьшем значении времени замораживания (24 часа) прочность бетона после термообработки растет с увеличением параметров термообработки (температуры и продолжительности) (рис.7 а); при среднем значении времени замораживания 48 часов рост прочности после термообработки с увеличением температуры термообработки снижается (рис. 7 б), а при наибольшем значении времени замораживания (72 часа) наблюдается снижение прочности бетона с увеличением температуры термообработки (рис.7 в). Эти особенности можно объяснить следующими физико-химическими процессами, протекающими в бетоне. Как известно из исследований ведущих отечественных и зарубежных ученых при замораживании свежизготовленного бетона свободная вода в макропорах превращается в лед, процесс гидратации цемента замедляется и может протекать только за счет незамерзшей, физико-химически связанной воды в гелях гидросиликата. Таким образом, при малых периодах замораживания (до 24 часов) проведение последующей термообработки может приводить к самоуплотнению и самозалечиванию бетона продуктами гидратации, так как после оттаивания локальные новообразования не способны сохранить структуру бетонного образца, и повышение температуры при последующей термообработке приводит к увеличению прочности бетона. С увеличением времени замораживания перед термообработкой, в бетонном образце возможно формирование центров кристаллогидратной структуры за счет протекания физико-химических процессов при взаимодействии зерен цемента с молекулами воды, содержащейся в цементном геле, и после оттаивания образца новообразования способны частично сохранять пористую структуру бетона. Поэтому процессы са-

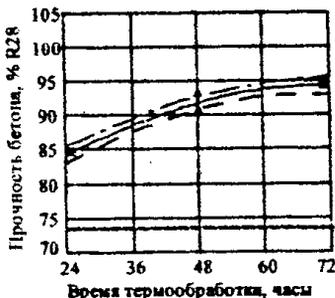
а) 24 часа замораживания перед т/обработкой



в) 72 часа замораживания перед т/обработкой



б) 48 часов замораживания перед т/обработкой



Температура термообработки:

- термообработка при 40 °C;
- термообработка при 50 °C;
- - - термообработка при 60 °C;
- без термообработки

Рис. 7. Графики нарастания прочности бетона (В/Ц=0,42; ЛСТ 0,2%) после замораживания в раннем возрасте, последующей термообработки и 28 суток нормального хранения

моуплотнения и самозалечивания в бетонных образцах в этом случае будут менее развиты, и увеличения прочности с повышением температуры термообработки не происходит (рис. 7б, в), поскольку параллельно с процессом оттаивания протекает процесс упрочнения пористой структуры образцов.

На основании этого можно сделать вывод, что с увеличением времени замораживания бетонных образцов для достижения наибольшей прочности необходимо использовать термообработку при температуре  $\approx 40^\circ\text{C}$ .

Четвертая глава содержит методологические принципы назначения технологических параметров конвективного прогрева монолитных тонкостенных конструкций.

Расчет параметров технологии конвективного прогрева выполняется в следующей последовательности.

1. Осуществляется выбор мощности теплогенератора. Кроме традиционно учитываемых потерь тепла через ограждения, в расчете учитываются расходы тепла на нагревание опалубки, бетона, инфильтрующегося воздуха. Следовательно, мощность теплогенератора:

$$Q_{\text{тепл.}} \geq Q_{\text{огр}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{в.о}} + Q_{\text{в.б.}} \quad (4)$$

где  $Q_{отр}$  – потери тепла через наружные ограждения, определяемые с учетом размеров и теплофизических характеристик ограждений;  $Q_n$  – расход тепла на прогрев инфильтрирующегося через ограждение воздуха, зависящий от высоты конструкции над уровнем земли, скорости ветра;  $Q_{н.о}$  – расход тепла на нагревание шитов опалубки, принимаемый с учетом технологических особенностей опалубочных шитов;  $Q_{н.б}$  – расход тепла на нагревание бетона, связанный с темпом термообработки конструкций.

II. Рассчитывается распределение температуры в бетоне конструкций при конвективном прогреве. Поскольку рассматриваемая система стен и перекрытий, образующих монолитные ячейки, является весьма сложной для определения температуры в бетоне, то для решения этой задачи вычленяются отдельные элементы: стены, перекрытия. Затем задаются граничные условия и рассматриваются температурные поля в бетоне конструкций.

Разработанная математическая модель имеет вид:

$$\frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_i}{c_i \cdot \rho_i} \left( \frac{\partial^2 t(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

для участка стены, возведенного ранее (рис. 8):

$$0 \leq x \leq d, \quad 0 \leq y \leq L, \quad H \leq z \leq H+d_1, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_0 \quad i=2$$

$$t(x, y, z, 0) = t_{cr} \quad (6)$$

для возводимой стены (рис. 8):

$$0 \leq x \leq d, \quad 0 \leq y \leq L, \quad 0 \leq z \leq H, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_0 \quad i=1$$

$$t(x, y, z, 0) = t_0 \quad (7)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t(x=d, y, z, \tau)}{\partial x} = k_{н.о} \cdot [t_\tau(y, z, \tau) - t(x=d, y, z, \tau)] \quad (8)$$

$$0 \leq y \leq L, \quad 0 \leq z \leq H, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_0$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t(x, y, z=0, \tau)}{\partial z} = k_{н.о} \cdot [t(x, y, z=0, \tau) - t_n(\tau)] \quad (9)$$

$$0 \leq x \leq d, \quad 0 \leq y \leq L, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_0$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t(x, y=0 \vee y=L, z, \tau)}{\partial y} = k_{н.о} \cdot [t(x, y=0 \vee y=L, z, \tau) - t_n(\tau)] \quad (10)$$

$$0 \leq x \leq d, \quad 0 \leq z \leq H, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_0$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t(x, y, z=H, \tau)}{\partial z} = -\lambda_2 \frac{\partial t(x, y, z=H, \tau)}{\partial z} \quad (11)$$

$$0 \leq x \leq d, \quad 0 \leq y \leq L, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_0$$

$$t_1(x, y, H, \tau) = t_2(x, y, H, \tau) \quad (12)$$

$$0 \leq x \leq d, \quad 0 \leq y \leq L, \quad 0 \leq \tau \leq \tau_0$$

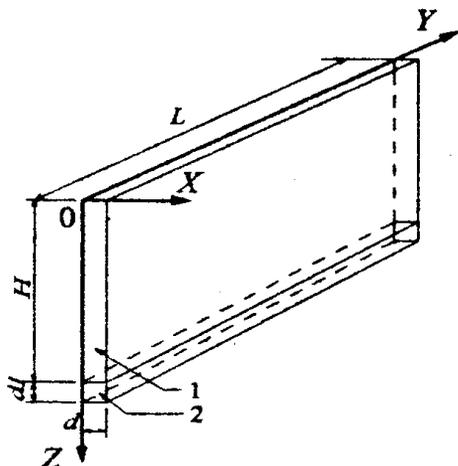


Рис. 8. Расчетная схема стены:  
1—бетонируемая стена; 2—ранее возведенный участок стены

где  $c$  — удельная теплоемкость бетона, Вт·ч/(кг·°C);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C);  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $t_{сн}, t_0$  — начальная температура соответственно ранее возведенной конструкции и свежееположенного бетона, °C;  $\tau_k$  — время термообработки, ч;  $k_{н.в.}, k_{н.о.}$  — коэффициент теплопередачи поверхности соответственно внутренних щитов опалубки и наружных щитов опалубки, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_{в}, t_{н}$  — соответственно температура воздуха внутри обогреваемого объема и температура наружного воздуха, °C.

Во всех обозначениях индекс «1» относится к бетонируемой конструкции, индекс «2» — к ранее возведенной конструкции.

Представленная математическая модель состоит из следующих элементов:

- (5) — дифференциальное уравнение теплопроводности для возводимой стены, а также для участка ранее возведенной конструкции;
- (6) — начальные условия для ранее возведенной конструкции;
- (7) — начальные условия для бетонируемой конструкции стены;
- (8) — граничные условия III — рода (теплообмен твердого тела с окружающей воздушной средой, описываемый законом Ньютона — Рихмана) для обогреваемой боковой поверхности опалубки стены;
- (9) — граничные условия III — рода для необогреваемой боковой поверхности опалубки стены, граничащей с наружным воздухом;
- (10) — граничные условия III — рода для необогреваемых торцевых поверхностей опалубки стены, граничащих с наружным воздухом;
- (11), (12) — граничные условия IV — рода (условие теплового примыкания двух твердых тел) для нижней поверхности возводимой стены в зоне контакта свежееположенного бетона с ранее возведенной стеной.

Аналогично записываются граничные условия для перекрытия.

Для численного интегрирования система уравнений (5) — (12) аппроксимировалась конечно-разностной схемой, решение которой возможно численным методом тепловых балансов. Вывод уравнений нестационарной теплопроводности этого метода для одномерного температурного поля был рассмотрен в работах Богословского В.Н., Исаченко В.П. и др. Используя описанные методологические принципы, была получена система уравнений, позволяющая определить температуру элемента  $t_{i,j,k}$  при трехмерном нестационарном температурном поле:

$$\begin{aligned}
 Q_{i,j,k} &= Q_{i-1,j,k} + Q_{i+1,j,k} + Q_{i,j-1,k} + Q_{i,j+1,k} + Q_{i,j,k-1} + Q_{i,j,k+1} \\
 Q_{i-1,j,k} &= [(t_{i-1,j,k} - t_{i,j,k}) \cdot \Delta\tau \cdot \Delta y \cdot \Delta z] / R_{i-1,j,k} \\
 Q_{i+1,j,k} &= [(-t_{i,j,k} + t_{i+1,j,k}) \cdot \Delta\tau \cdot \Delta y \cdot \Delta z] / R_{i+1,j,k} \\
 Q_{i,j-1,k} &= [(t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}) \cdot \Delta\tau \cdot \Delta x \cdot \Delta z] / R_{i,j-1,k} \\
 Q_{i,j+1,k} &= [(-t_{i,j,k} + t_{i,j+1,k}) \cdot \Delta\tau \cdot \Delta x \cdot \Delta z] / R_{i,j+1,k} \\
 Q_{i,j,k-1} &= [(t_{i,j,k-1} - t_{i,j,k}) \cdot \Delta\tau \cdot \Delta x \cdot \Delta y] / R_{i,j,k-1} \\
 Q_{i,j,k+1} &= [(-t_{i,j,k} + t_{i,j,k+1}) \cdot \Delta\tau \cdot \Delta x \cdot \Delta y] / R_{i,j,k+1} \\
 Q_{i,j,k} &= \Delta V_{i,j,k} \times \rho_{i,j,k} \times c_{i,j,k} \times (t_{i,j,k}^{\tau+\Delta\tau} - t_{i,j,k}^{\tau}),
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

где  $\Delta\tau$  – временной шаг расчета, ч;  $R$  – термическое сопротивление между узлами,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ ,  $\Delta V_{i,j,k}$  – объем элемента.

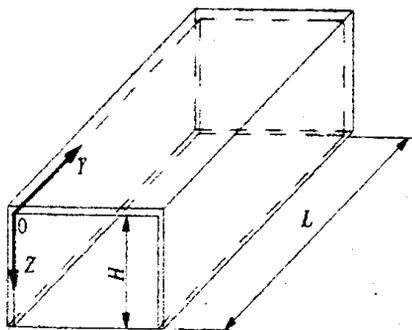


Рис. 9. Расчетная схема для определения температуры в пространстве тоннеля

Вычисление граничных условий для обогреваемой поверхности стены (8) возможно в том случае, если известно распределение температуры воздуха внутри объема тоннеля. По результатам исследований были получены зависимости для расчета температуры в объеме тоннеля при конвективных методах прогрета.

«Традиционный» камерный прогрев. В результате наблюдений было отмечено, что при этом методе термообработки возникает неравномерное распределение температуры воздуха по высоте и длине прогреваемого объема (разность температуры воздуха до  $40^\circ\text{C}$ ). После математической обработки результатов исследований была получена аппроксимирующая зависимость температуры в  $i$ -м элементарном воздушном объеме от его местоположения и среднего значения температуры воздуха в тоннеле (рис.9):

$$\begin{aligned}
 t_i &= 45,65 \cdot (y/L) + 0,32 \cdot (z/H) - 33,27 \cdot (y/L) \cdot (z/H) + 0,98 \cdot t_{cp} - 11,0 \cdot (y/L)^2 - 7,0 \cdot (z/H)^2 - \\
 &- 10,62 + 0,0006 \cdot (t_{cp})^2,
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

где  $t_{cp}$  – среднее значение температуры воздуха в пространстве тоннеля:  $10^\circ\text{C} \leq t_{cp} \leq 50^\circ\text{C}$  (при  $t_{cp} < 10^\circ\text{C}$  температура воздуха в нижней части тоннеля отрицательна; при  $t_{cp} > 50^\circ\text{C}$ , возможен нагрев бетона в верхней части стены и перекрытия выше значений, регламентируемых строительными нормами);  $L, H$  – соответственно длина и высота тоннеля, м;  $y, z$  – координаты по длине и высоте тоннеля, м:  $0 \leq y \leq L, 0 \leq z \leq H$ .

Средняя температура воздуха в объеме тоннеля  $t_{cp}$  находится из решения системы уравнений теплового баланса:

$$\begin{aligned}
 Q_{отр} &= \sum_{i=1}^n [(t_{cp} - t_{wi}) \cdot n_i \cdot F_i \cdot \beta_i] / R_i \\
 Q_{in} &= (\sum \beta_{0j} \cdot j \cdot c_n \cdot F_i + \sum \beta_{0j} \cdot j \cdot c_n \cdot l) \times (t_{cp} - t_{wi}) \\
 Q_{эл} &= Q_{отр} + Q_{in}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

где  $F_i$  — площадь ограждения,  $m^2$ ;  $R_i$  — термическое сопротивление ограждения;  $(m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$ ;  $t_{вн}$  — температура наружного воздуха,  $^\circ C$ ;  $Q_{отр}$ ,  $Q_n$  — потери тепла соответственно через ограждающие конструкции и на инфильтрацию, Вт;  $n_i$ ,  $\beta_j$  — коэффициенты, принимаемые в зависимости от положения наружных поверхностей ограждающих конструкций;  $l$  — длина стыков, щелей, м;  $\beta_0$ ,  $j$  — коэффициенты, зависящие от вида конструкции, ее высоты над уровнем земли, температуры наружного воздуха и скорости ветра;  $c_a$  — теплоемкость воздуха  $Вт \cdot ч/(кг \cdot ^\circ C)$ .

«Камерный прогрев с воздуховодами». Результаты проведенных исследований свидетельствуют о более равномерном распределении температуры по длине тоннеля при «камерном прогреве с воздуховодами» по сравнению с «традиционным» камерным прогревом. Однако при данном методе термообработки отмечено неравномерное распределение температуры по высоте тоннеля (разность температуры воздуха до  $20^\circ C$ ). В связи с этим после математической обработки результатов исследований была получена аппроксимирующая зависимость температуры в  $i$ -м элементарном объеме от его местоположения по высоте и среднего значения температуры воздуха в тоннеле:

$$t_i = 8,33 \cdot (z/H)^2 + 0,001 \cdot (t_{cp})^2 + 0,26 \cdot (z/H) \cdot t_{cp} - 7,30 \cdot (z/H) + 1,6 + 0,77 \cdot t_{cp} \quad (16)$$

где  $t_{cp}$  — среднее значение температуры воздуха в пространстве тоннеля:  $10^\circ C \leq t_{cp} \leq 50^\circ C$ ;  $H$  — высота тоннеля в метрах;  $z$  — координата по высоте тоннеля в метрах:  $0 \leq z \leq H$ .

Среднее значение температуры воздуха в пространстве тоннеля находится аналогично предыдущему методу.

Полученные зависимости (14), (16) применимы для расчета распределения температуры воздуха в пространстве тоннеля при выполнении условия  $0,5 \leq (H/L) \leq 0,62$  и их погрешность в этом случае составляет не более 13%.

«Конвективный прогрев с приопалубочными шторами». При использовании данного метода отмечено более равномерное распределение температуры в приопалубочном пространстве по длине и высоте прогреваемых конструкций по сравнению с предыдущими методами. В связи с этим, допустимо принять равномерное распределение температуры в приопалубочном пространстве. Температуру воздуха внутри тоннеля  $t$  и температуру воздуха в приопалубочном пространстве  $(t + \Delta t)$  можно найти, решив систему уравнений теплового баланса:

$$\left. \begin{aligned} Q_{отвн} &= \sum_{i=1}^n [(t + \Delta t) - t_{вн}] \cdot n_i \cdot F_i \cdot \beta_i / R_i \\ Q_n &= (\sum_{j=1}^n \beta_{0j} \cdot c_a \cdot F_j + \sum_{j=1}^n \beta_{0j} \cdot c_a \cdot D) \cdot (t - t_{вн}) \\ Q_{отвн} &= [(t - t_{вн}) \cdot n_i \cdot F_{отвн} \cdot \beta_i] / R_{отвн} \\ Q_{отвн} &= [(t - t_{вн}) \cdot n_i \cdot F_{отвн} \cdot \beta_i] / R_{отвн} \\ Q_{приопалубочн} &= \sum_{i=1}^n \Delta t \cdot F_{приопалубочн} / R_{приопалубочн} \\ Q_{эл} &= Q_{отвн} + Q_n + Q_{отвн} + Q_{приопалубочн} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где  $Q_{ин}$ ,  $Q_{пол}$ ,  $Q_{шт}$  – потери тепла в тоннеле соответственно на инфильтрацию, через пол и через входную теплоизолирующую штору, Вт;  $Q_{окна}$ ,  $Q_{приопл.шт}$  – потери тепла приопалубочного пространства через конструкцию стен, перекрытий и через приопалубочные шторы, соответственно, Вт;  $F_{приопл.шт}$  – площадь приопалубочных штор, м<sup>2</sup>;  $R_{приопл.шт}$  – сопротивление теплопередаче приопалубочных штор, (м<sup>2</sup>·°C)/Вт.

III. На основании полученного распределения температуры рассчитывается распределение прочности в бетоне прогреваемой конструкции через задаваемый период времени.

Разработанная методика расчета параметров термообработки монолитных тонкостенных конструкций был реализована в программе «Microsoft Excel 2000». Значения температуры в бетоне стены при различных методах конвективного прогрева, найденные расчетным путем, имели хорошую корреляцию с экспериментально полученными данными (рис.10). В результате настройки математической модели расхождение значений, полученных в результате расчета и экспериментально, составило не более 3°C.



Рис. 10. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений температуры в бетоне стены: числитель расчетное значение температуры, °C; знаменатель экспериментально полученное значение температуры, °C

В пятой главе выполнено сравнение эффективности капиталовложений при различных способах ведения работ, согласно «Методическим рекомендациям по оценке эффективности инвестиционных проектов и отбору их для финансирования», 1994 г. Горизонт расчета был равен 6 месяцам, что соответствует периоду зимнего бетонирования в климатических условиях Урала и Западной Сибири. При расчете капиталовложений учитывали: стоимость материалов, заработную плату, амортизацию оборудования, затраты электроэнергии. Расчет выполнялся в текущих ценах, при условии ежемесячной термообработки 1000 м<sup>3</sup> бетона. Анализ полученных результатов (рис.11) показал, что для «конвективного прогрева с приопалубочными шторами» площадь под кривой капиталовложений минимальна, следовательно, эффективность капиталовложений данного метода наиболее высокая. Затраты на единицу прогреваемого бетона составляют: 340 руб./м<sup>3</sup> при «традиционном» камерном прогреве, 311 руб./м<sup>3</sup> при «камерном прогреве с воздуховодами», 288 руб./м<sup>3</sup> при «конвективном прогреве с приопалубочными што-

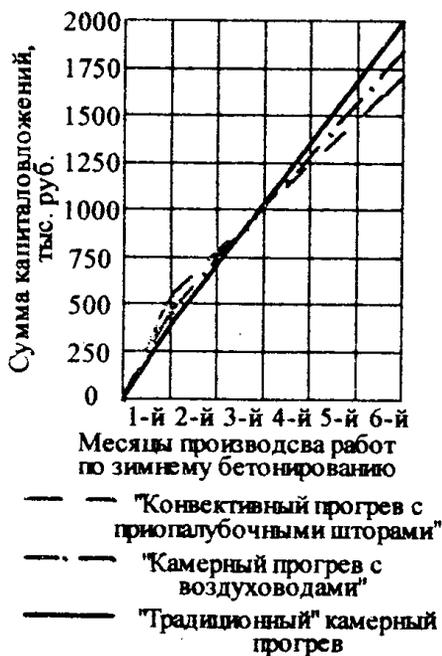


Рис. 11. Расчет эффективности капиталовложений

рами». Таким образом, использование метода «конвективного прогрева с приопалубочными шторами» позволяет сократить затраты электроэнергии до 25%, уменьшить затраты на зимнее бетонирование до 15%.

Внедрение на стоящихся объектах Южного Урала метода «конвективного прогрева с приопалубочными шторами» позволило определить пути дальнейшего сокращения трудозатрат на монтаж оборудования и обеспечения качества возводимых конструкций.

На основании выполненных исследований разработан «Технологический регламент конвективного прогрева монолитных тонкостенных конструкций». Технологический регламент включает следующее. В первом разделе «Область применения» описывается диапазон климатических условий и характеристик конструкций, для которых могут быть использованы методы конвективного прогрева. Во втором разделе «Основные положения» приведены указания по подготовке, бетонированию, термо-

обработке и уходу за возводимыми в зимний период тонкостенными конструкциями. В третьем разделе «Выбор теплогенератора» изложена методика выбора теплогенераторов в зависимости от климатических условий, теплофизических характеристик оснастки, геометрии и темпа возведения конструкций и представлены теплофизические параметры наиболее распространенных типов теплогенераторов. В четвертом разделе «Расчет параметров термообработки» приведена методика определения температуры в конструкциях через заданные периоды термообработки численным методом тепловых балансов, на основании полученных значений температуры прогнозируется прочность бетона возводимых конструкций. В пятом разделе «Контроль прочности бетона» приведены рекомендации по определению фактической прочности прогреваемого бетона и времени окончания прогрева.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Выполненные в рамках диссертационной работы исследования позволили сформулировать следующие выводы.

1. На основании анализа методов конвективного прогрева проведена их классификация по принципу подведения теплового потока. Выделены следующие

методы: «традиционный» камерный прогрев, «камерный прогрев с воздуховодами», и разработан новый метод «конвективный прогрев с приопалубочными шторами». Предложенный метод заявлен на получение патента Российской Федерации на изобретения.

2. Исследовано распределение температуры и прочности в бетоне стен и перекрытий при различных методах термообработки: установлено, что при «камерном прогреве с воздуховодами» и «конвективном прогреве с приопалубочными шторами» происходит формирование более равномерного температурного поля по площади конструкций, по сравнению с «традиционным» камерным прогревом. «Конвективный прогрев с приопалубочными шторами» характеризуется более высокими температурами в бетоне и более интенсивным темпом нарастания прочности (средняя прочность в бетоне стен, перекрытий через 90 часов термообработки – 70%  $R_{28}$ ), по сравнению с «традиционным» камерным прогревом (стены 48%, перекрытия 61%  $R_{28}$ ), с «камерным прогревом с воздуховодами» (стены 55%, перекрытия 58%  $R_{28}$ ). «Конвективный прогрев с приопалубочными шторами» позволяет сократить сроки термообработки до 20%.

3. Проведенные исследования показали, что при низких значениях температуры наружного воздуха (ниже минус 22°C) при «традиционном» камерном прогреве не исключается замораживание бетона в нижней части стены в зоне соприкосновения с ранее уложенным набравшим прочность бетоном. Для повышения прочности бетона, подвергшегося раннему замораживанию, было предложено проведение последующей термообработки.

4. Исследовано влияние водоцементного отношения в интервале от 0,42 до 0,59, пластифицирующей добавки и параметров термообработки на прочность бетонных образцов, подвергшихся замораживанию в раннем возрасте. Полученные аналитические зависимости свидетельствуют о целесообразности применения термообработки для бетонов с малым водоцементным отношением ( $В/Ц \approx 0,42$ ), замороженных в раннем возрасте при условии, что время замораживания не превышало 24 часа (прочность после замораживания, термообработки и твердения при положительных температурах может достигать марочной). С увеличением времени замораживания эффективность термообработки снижается. Зафиксировано положительное влияние пластифицирующей добавки ЛСТ на прочность бетона, подвергшегося раннему замораживанию и дальнейшей термообработке (прочность бетона с добавкой превышает прочности бетона без добавки до 8%).

5. Уточнена методика расчета параметров теплогенератора. При определении требуемой мощности теплогенератора кроме традиционно учитываемых потерь тепла через ограждение, учитываются также расходы тепла на нагрев инфильтрующегося воздуха, на нагрев опалубки и бетона.

6. Разработана математическая модель трехмерного нестационарного температурного поля, сформулированы граничные условия для возводимых конструкций. Получены математические зависимости, позволяющие выполнить расчет температуры воздуха в объеме тоннеля при различных методах конвективного прогрева. При соблюдении условий расчета их погрешность составляет не бо-

лее 13%. Предлагаемая математическая модель используется для расчета температуры бетона прогреваемых конструкций.

7. Разработан технологический регламент конвективного прогрева монолитных тонкостенных конструкций, включающий следующие разделы: «Область применения», «Основные положения», «Выбор теплогенератора», «Расчет параметров термообработки», «Контроль прочности бетона».

8. Произведено внедрение метода «конвективного прогрева с приопалубочными шторами» на строящихся объектах в климатических условиях Южного Урала, определены пути его дальнейшего совершенствования. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования метода. Применение «конвективного прогрева с приопалубочными шторами» позволяет снизить затраты электроэнергии до 25%, уменьшить затраты на зимнее бетонирование до 15%.

Основные положения работы изложены в следующих публикациях:

1. Мельник А.А. Натурные исследования твердения бетона в стене при камерном обогреве в зимнее время // Строительство и образование: Сборник научных трудов. – Екатеринбург: ГОУ УГТУ – УПИ, 2002. Вып.5 – С. 200 – 201.
2. Мельник А.А. Методы снижения затрат электроэнергии при термообработке монолитных стен // Новый уральский строитель – 2002 – №9. – С. 24 – 25.
3. Мельник А.А., Головнев С.Г., Коваль С.Б. Термообработка мелкоштучных изделий из бетона // Инженерная защита окружающей среды в транспортно-дорожном комплексе: Сб. науч. тр. / МАДИ (ГТУ), УФМАДИ (ГТУ). – М., 2002. – С. 101 – 105.
4. Технологический регламент конвективного прогрева тонкостенных монолитных конструкций / Мельник А.А., Головнев С.Г., Коваль С.Б. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 30 с.

Издательство Южно-Уральского государственного  
университета

---

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 12.11.2002. Формат 60х84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 297/442.

---

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.