

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

*На правах рукописи*

ЯРОШ Татьяна Владимировна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ТВЕРДЕЮЩЕМ БЕТОНЕ  
И РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ  
ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность 05.14.04 — Промышленная теплоэнергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев 1992

Работа выполнена в Киевском инженерно-строительном институте

Научный руководитель:

канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
КОНОШЕНКО Г.Н.

Официальные оппоненты:

докт. техн. наук, проф.  
ПЕКИМЕНКО П.И.,  
канд. техн. наук, проф.  
БЕШ П.И.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00816367 (V)

Ведущая организация:

Институт проблем моделирования  
в энергетике АН Украины

Защита состоится "27" 10 " 1992 г. в "15" часов на заседании специализированного совета КО16.43.02 в Институте технической теплофизики АН Украины, 252057, г. Киев - 57, ул. Желябова, 2 а.

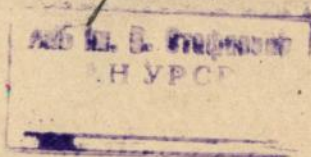
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института технической теплофизики АН Украины /г. Киев, ул. Желябова, 2 а/.

Автореферат разослан "26" 09 " 1992г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
канд. техн. наук.

*Кривошей*

Ф.А. Кривошей



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность тем. Промышленность сборного железобетона, производя большой объем продукции, является крупнейшим потребителем энергоресурсов. Непременным и важнейшим по влиянию на изделия этапом изготовления сборного железобетона входит тепловая обработка (ТО), которая занимает 70+80% всего времени изготовления изделий, и забирает более 70% всех энергоресурсов. Основной целью всех работ и исследований режимов ТО является сокращение энергетических затрат при сохранении достаточного уровня прочности бетона. При этом, как правило, разработка режимов основывается на проведении исследований набора прочности бетоном в зависимости от продолжительности выдержки его при определенных температурах, но практически нет методик, учитывающих теплофизические особенности бетона, подвергаемого тепловому воздействию, определяемых нелинейностью коэффициента теплопроводности и тепловыделения цемента, несмотря на обширные исследования в этой области. Кроме того, при назначении режимов ТО не исследовались способы оптимальной подачи теплоты для поддержания необходимого температурного режима в прогреваемом изделии.

Цель работы. Разработка методики подбора режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий, которые бы обеспечивали определенные температурные режимы при наиболее оптимальной организации подачи тепловой энергии с учетом теплоосприятности и теплофизических особенностей твердеющего бетона, таких как наличие внутреннего источника теплоты, зависящего от температуры и времени, и нелинейности коэффициентов теплопереноса при условии набора заданных уровней прочности. Исследование кинетики экзотермии для применяемых температурных режимов и заданной номенклатуры изделий. Получение зависимостей теплофизических характеристик от температуры и времени, которые можно было бы использовать при разработках режимов ТО.

Научная новизна. В результате проведенных исследований предложена расчетно-экспериментальная методика определения зависимости коэффициента теплопроводности бетона от температурно-временного фактора. Получены зависимости  $\lambda(t, \tau)$  для бетона М-300 на цементе ПЦ-500 подвергаемого ТО в закрытой форме по двум режимам с различной температурой изотермического прогрева и при естественном твердении. Доказана корреляция между  $\lambda(t, \tau)$  и интенсивностью тепловыделения бетона  $q_p(t, \tau)$ . Предложена методика определения вклада экзотермии в общий баланс ТО и повышения температуры, вызванного ее действием. Исследовано влияние параметров бетонного изделия и ре-

жима ТО на кинетику тепловыделения. Разработана и экспериментально проверена методика подбора оптимальных с точки зрения энергетических затрат режимов ТО, обеспечивающих заданные уровни температуры, достаточные для полноценного набора прочности. Предложен и экспериментально проверен режим прерывистой подачи теплоты при ТО бетонных изделий в закрытых формах.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Результаты работы использованы при разработке и внедрении в тресте Южэнергомонтаж ВО Союзатомэнергостроя СССР исследований хозяйственной тематики "Разработка технологического процесса термообработки бетонных моноблоков в осенне-зимний период на термоподдоне конструкции ЮЭМ" с годовым экономическим эффектом 216 тыс. рублей в 1988 году.

Публикации и апробация работы. Основные результаты работы опубликованы в 8-ми статьях и 3-х рукописях, доложены на Всесоюзной конференции молодых ученых в ИТФ АН Украины, г. Киев, 1983 г., на межрегиональном научном семинаре, г. Пенза, 1989 г., на 8-ми научно-практических конференциях КИСИ, г. Киев, 1983-1990 гг., получено положительное решение на заявку на метод ТО.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и содержит 136 страниц машинописного текста, 58 рисунков, список литературы, содержащий 100 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы и формулируется цель исследований, проводимых в диссертационной работе. Содержится изложение того нового, что вносится автором в исследование проблемы, и перечисляются результаты исследований, выносимые на защиту. Приводится краткое содержание диссертационной работы.

В первой главе приводится краткий обзор состояния исследований процессов тепло-массопереноса в твердеющем бетоне при ТО и возможности применения некоторых из них при подборе режимов ТО. Исходя из анализа исследований следует, что твердеющий бетон представляет собой поликапиллярное влажное тело с изменяющейся во времени структурой. Первоначальная макропористая структура которого по мере прохождения процесса гидратации и кристаллизации цементного тела постепенно превращается в капиллярно-пористую с преобладанием в объеме контракционных пор, которые со временем под влиянием движения влаги по направлению теплового потока становятся сообщающимися капиллярами. Процессы кристаллизации, или набора прочности цементным тестом, контракции и гидратации, а соответственно и

выделения теплоты и стока влаги, обусловленного переходом жидкости с физико-механической формой связи в жидкость с химической и физико-химической формами, протекают одновременно. И по кинетике одного из этих процессов можно судить о прохождении остальных. Температурный фактор не изменяет общего характера прохождения этих процессов, а только ускоряет их и несколько увеличивает общую пористость бетона.

Т.к. бетон представляет собой влажное поликапиллярное тело с распределенной газообразной фазой, то процессы теплопереноса в условиях термообработки носят взаимосвязанный характер. Коэффициенты тепло-массопереноса, дающие количественную характеристику изменения потенциалов тепло-массопереноса, определяются структурными особенностями материала. Поэтому для бетона они должны изменяться в зависимости от степени закристаллизованности цементного теста, т.е. зависеть от температуры и времени. На сегодняшний день имеется много работ, подтверждающих эту зависимость для коэффициентов теплопроводности и массопереноса. Удельная теплоемкость твердеющего бетона, как показали практически все исследования, во время термообработки изменяется незначительно. Кроме того, в ряде работ доказывается факт незначительного влияния массопереноса в тяжелом бетоне на формирование температурных полей, т.е. проведения исследований формирования температурных полей можно строить математические модели, основанные только на учете процессов теплопереноса.

Экзотермичность реакции гидратации вносит в объем бетона распределенный источник теплоты, зависящий от термохимической активности цемента. Ввиду того, что тепловыделение идет как непосредственный результат кристаллизации цементного теста, то очевидно, что интенсивность тепловыделения и суммарное тепловыделение являются функциями температуры и времени. Зависимость тепловыделения от температурно-временного фактора изучена сейчас достаточно хорошо и полно. Для количественного учета влияния теплоты экзотермии при проведении расчетов температурных полей в бетоне во время ТО предлагался ряд эмпирических и аналитических выражений, но ни одно из них не дает полного представления о кинетике тепловыделения в диапазоне температур ТС. Поэтому для точного учета влияния экзотермии при проведении прогнозирующих расчетов по определению наиболее оптимальных режимов подачи теплоты была выбрана, как наиболее достоверная, методика построения нестационарной кривой кинетики тепловыделения по экспериментально полученным семействам изотермических кривых  $q_s(t, \tau)$  методом равных тепловыделений.

После анализа исследований, посвященных моделированию процес-

сов теплопереноса в твердеющем бетоне, в качестве наиболее оптимальной и универсальной как для изучения и анализа теплопереноса в бетоне, так и для прогнозирования режимов ТО, была выбрана модель, основанная на уравнении нестационарной теплопроводности с внутренним источником теплоты и коэффициентом теплопроводности, зависящими от температуры и времени. Граничные условия могут определяться в зависимости от вида ТО. При этом должна быть разработана методика построения коэффициента теплопроводности от температурно-временного фактора.

Во второй главе с использованием метода решения обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) были разработаны методики определения зависимостей  $\lambda(\tau)$  и  $\lambda(t, \tau)$  твердеющего бетона.

Методика определения  $\lambda(\tau)$  состояла из следующих этапов. Первый - измерение температур в бетонном образце из бетона М-300 на цементе ШИ-500, с крупностью заполнителя 10+20 мм на лабораторной установке при нескольких режимах ТО (два режима с различной температурой изотермического прогрева и естественное твердение). Лабораторная установка представляет собой теплоизолированную закрытую кубическую форму, одна из граней которой является электронагревателем. Режим работы нагревателя регулировался изменением напряжения с помощью автотрансформатора. С помощью амперметра и вольтметра в цепи обогрева рассчитывалась мощность теплового потока и соответственно тепловые затраты. Конструкция установки и методика измерения температур разрабатывались на основе требований, предъявляемых к экспериментальным данным при решении ОЗТ. Второй этап заключался в определении зависимости  $\lambda(\tau)$  решением внутренней ОЗТ. Для решения ОЗТ использовался метод подбора из класса экстремальных методов. При решении этим методом на основе априорных данных о величине коэффициента теплопроводности выбирается начальное значение  $\lambda(\tau)$ , которое подставляется в математическую модель, и затем решается прямая задача теплопроводности (ПЗТ). В процессе решения ПЗТ определяется поле температур, которое сравнивается с полученным экспериментально. Далее для уточнения значения  $\lambda(\tau)$  организуется итерационный процесс, в котором на каждом шаге находится величина невязки в определенной точке  $i$  между значениями расчетной и экспериментальной температур:  $\Delta_i = |t_{ui} - t_{ni}|$ , где  $t_{ui}$  - измеренная температура,  $t_{ni}$  - расчетная температура. Признаком окончания поиска было выполнение условия:  $\Delta_i \leq \epsilon$ , где  $\epsilon$  назначалась исходя из точности измерения температуры.

Процесс теплопереноса в бетонном образце при ТО описывался следующей математической моделью (ПЗТ):

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(t, x) \frac{\partial t}{\partial x}) + \zeta q_3(t, \tau) + K_f \alpha (t - t_{cp})$$

(I)

$$0 < \tau \leq \tau_k; \quad 0 \leq x \leq R;$$

$$t(x, 0) = t_n; \quad t(0, \tau) = t_1(\tau); \quad t(R, \tau) = t_2(\tau),$$

где:  $t$  - температура, °С;  $\tau$  - время с;  $x$  - координата, направленная в глубину изделия, м;  $c$  - удельная теплоемкость, Дж/кг·К;  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $q_3$  - интенсивность тепловыделения, Вт/кг;  $\zeta$  - количество цемента в 1 м<sup>3</sup> бетона, кг/м<sup>3</sup>;  $K_f$  - коэффициент формы (для куба  $K_f = 0.25$  1/м);  $t_{cp}$  - температура окружающей среды, °С;  $t_n$  - начальная температура, °С;  $t_1$ ,  $t_2$  - экспериментальные значения температур, °С;  $R$  - толщина образца, м;  $\tau_k$  - продолжительность ТО, с.

ПЭТ решалась методом конечных разностей,  $q_3(t, \tau)$  моделировалась методом равных тепловыделений.

До определения  $\lambda(\tau)$  был проведен ряд методических расчетов для определения величины критического шага,  $\Delta \tau_{кр}$ . Кроме того методические расчеты показали, что алгоритм обладает свойствами сходимости и устойчивости и дает возможность получить значение  $\lambda(\tau)$  с наперед заданной точностью. В пределах одного шага  $\lambda(\tau)$  считался постоянной величиной. В последующем по дискретным значениям аппроксимировалась непрерывная зависимость  $\lambda(\tau)$ . По данному алгоритму расчеты проводились для двух режимов ТО и для условий естественного твердения, при этом изменялись только динамика  $t_1(\tau)$  и  $t_2(\tau)$ . Алгоритм был реализован на ПЭВМ. Время счета при  $\tau_k = 12$  час. для ТО составило 20 мин., а при естественном твердении при  $\tau_k = 24$  часа - 45 мин. В результате расчетов получены три зависимости

$\lambda(\tau)$  (рис. 1, а). Видно, что диапазон изменения коэффициентов примерно один и тот же от 1.1+1.3 Вт/м·К до 3+3.2 Вт/м·К, и установлено, что эти величины определяются только составом бетона. Температура твердения влияет только на время наступления минимума и на время выхода его на постоянное значение. Чем выше температура, тем скорее наступает минимум и стадия стабилизации, т.е. при более высоких температурах кривая  $\lambda(\tau)$  сжимается, а при более низких растягивается. Из сравнения хода кривых  $\lambda(\tau)$  и  $q_3(t, \tau)$  (рис. 1, б) при решении ПЭТ отмечено совпадение времени наступления их экстремумов, максимума  $q_3(t, \tau)$  и минимума  $\lambda(\tau)$ . Это совпадение подтверждает тот факт, что изменение коэффициента теплопроводности и интенсивности тепловыделения от температурно-временного фактора является следствием протекания одних и тех же процессов -

формирования структуры бетона. Кроме того было отмечено совпадение времени выхода на стабилизационную стадию со временем наступления минимума кривой  $q_*(t, \tau)$  (рис. 1, в). На основе отмеченных закономерностей была предложена методика построения зависимости  $\lambda(t, \tau)$  бетонов на цементах с известными  $q_*(t, \tau)$  для любого режима. Которая состояла из следующих этапов. Первый – определение пределов изменения  $\lambda(t, \tau)$  с помощью решения ОЗТ по разработанному алгоритму. Второй – построение семейства кривых для изотермических условий, соответствующих некоторому набору температур, время наступления экстремумов у которых определяется по динамике соответствующих изотермических кривых  $q_*(t, \tau)$  (рис. 2, б). И третий – построение  $\lambda(t, \tau)$  для нестационарных условий ТО с помощью метода равных тепловыделений, когда время перехода с одной изотермической кривой  $\lambda(t, \tau)$  на другую по мере роста температуры определяется по ходу кривых тепловыделения  $\bar{q}_*(t, \tau)$  (рис. 2, а).

С использованием предложенной методики построения  $\lambda(t, \tau)$  были проведены расчеты температурных полей в бетонном образце для одного из исследуемых режимов ТО. В расчетах изотермические кривые  $\lambda(t, \tau)$  аппроксимировались сплайнами I-го порядка (рис. 2, в). При сравнении экспериментальных и расчетных температур наибольшая абсолютная погрешность составила  $1.58^\circ\text{C}$ ; в то же время температуры, полученные при расчетах с постоянным коэффициентом теплопроводности  $1.28 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  показали абсолютную погрешность свыше  $20^\circ\text{C}$ .

В третьей главе приводится методика расчета вклада экзотермии в общий тепловой баланс ТО и исследуется влияние характеристик изделия и параметров режима на кинетику тепловыделения на примере бетонной панели. Оценка тепловыделения бетона необходима при оптимизации режимов ТО и разработке технологических решений по сокращению тепловых затрат. Параметры тепловой обработки были условно разделены на внутренние (габариты изделия, марка и количество цемента в  $1 \text{ м}^3$  бетона) и внешние – температурно-временные характеристики режима (длительность предварительного выдерживания, температура предварительного прогрева, скорость подъема температуры, температура изотермического прогрева и его продолжительность). Внутренние параметры изделия являются исходными при назначении режимов, а управляя внешними параметрами можно подобрать режимы наиболее оптимальные с точки зрения энергетических затрат, когда тепло экзотермии становится значительным резервом экономии теплоты, при условии поддержания определенного уровня температур в изделии, необходимо-го для полноценного набора прочности.

Для описания процессов теплопередачи в твердеющей бетонной панели использовалась следующая математическая модель:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda(t, \tau)}{c\rho} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{4}{c\rho} q_3(t, \tau). \quad (2)$$

На обогреваемой поверхности граничные условия соответствовали способу Т0: для контактного обогрева -  $t(0, \tau) = t_{cp}(\tau)$ , для конвективно-го -  $\partial t / \partial x = -d / \lambda (t_{cp}(\tau) - t_n)$  ( $t_n$  - температура поверхности). На необогреваемой поверхности  $\partial t(R_0, \tau) / \partial x = \partial t(R_0, \tau) / \partial x$ .

Для проведения расчетов использовалась явная конечно-разностная схема, причем

$$t_i^j = \frac{\lambda \Delta \tau}{c\rho \Delta x^2} (t_{i-1}^{j-1} - 2t_i^{j-1} + t_{i+1}^{j-1}) + \frac{4}{c\rho} \Delta \tau q_{3i}^{j*}, \quad (3)$$

где:  $i$  - номер шагов по координатной сетке,  $j$  - номер шагов по времени,  $q_{3i}^{j*}$  - вычисляется по методу равных тепловыделений. При конечно-разностной аппроксимации граничных условий III-го рода и условия симметрии были получены соотношения, которые позволили увеличить точность их аппроксимации до величины  $O(\Delta x^4)$ .

При проведении сравнительных расчетов коэффициент теплопроводности принимался постоянным - 2 Вт/м·К (из диапазона I, I+3.4 Вт/м·К). В явной конечно-разностной схеме прирост температуры в точке  $i$  за счет внутреннего тепловыделения  $\Delta t q_{3i}$  за время  $\Delta \tau$  представлен последним членом. Среднеобъемный прирост температуры в панели за все время Т0 будет:

$$\bar{t}_{q_3} = \frac{4 \Delta \tau}{c\rho N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N q_{3i}^{j*}, \quad (4)$$

а количество теплоты, выделившейся в изделии за весь период Т0, определялся как:

$$\bar{Q}_3 = 4 \Delta x \Delta \tau \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N q_{3i}^{j*}, \quad (5)$$

Для подсчета необходимого теплового потока, поддерживающего заданную температуру на поверхности изделия, решалась псевдообратная задача теплопроводности, в которой по значениям температуры на обогреваемой поверхности и в прилегающем слое рассчитывалась мощность теплового потока  $q_f$  (Вт/м<sup>2</sup>). Эта задача, как и любая ОБТ, является оптимизационной и позволяет определить наиболее оптимальный режим подвода теплоты к поверхности изделия. Плотность внешнего теплового потока определялась из выражения  $q_f = -\lambda \partial t / \partial x|_{x=0}$ .

При конечно-разностной реализации  $q_f$  аппроксимировался с точностью  $O(\Delta x^2)$ . Необходимое количество теплоты на организацию ТО в расчете на  $1 \text{ м}^2$  обогреваемой поверхности определялось по формуле:

$$Q_f = \sum_{j=1}^k q_f \Delta \tau, \quad (\text{Дж}) \quad (6)$$

Для выявления доли теплоты экзотермии в общих тепловых затратах был введен коэффициент участия экзотермии  $K_e = \bar{Q}_e / Q_f \cdot 100\%$ .

Точность предлагаемой методики определения доли экзотермии в общем тепловом балансе проверялась сравнением значений теплоты экзотермии, полученной из расчета теплового баланса экспериментальной установки во время ТО бетонного образца. Погрешность в определении теплоты экзотермии составила 6.3%.

В процессе исследования влияния параметров ТО (внутренних и внешних) на объемную интенсивность тепловыделения  $\zeta q_v$  ( $\text{Вт}/\text{м}^3$ ), величину тепловыделения  $\bar{Q}_e$  (Дж), внешний тепловой поток  $Q_f$  (Дж) и значение  $K_e$  были проведены многовариантные расчеты в следующей последовательности: в начале определялось влияние на эти величины внутренних параметров ТО при наиболее распространенном режиме 2-10 (два часа подъем температуры от  $20^\circ\text{C}$  до  $80^\circ\text{C}$  и изотермический прогрев при  $80^\circ\text{C}$  в течении десяти часов) для наиболее характерных толщин изделий  $R$ : 0.1, 0.15, 0.2, 0.4 м, величин  $\zeta$ : 330, 350, 450  $\text{кг}/\text{м}^3$  и видов цемента: ПЦ-400, ПЦ-500 и БЦ-500. Затем исследовалось влияние внешних параметров для определенных толщин и составов бетона.

Алгоритм расчета был реализован на ПЭВМ, время счета одного варианта составило 30 мин. В результате проведенных расчетов были сделаны следующие выводы.

1. Чем больше габариты изделия, тем больше выделяется теплоты в абсолютных единицах в расчете на  $1 \text{ м}^2$  обогреваемой поверхности (рис. 3), и тем большую долю составляет экзотермия в общем тепловом балансе: так для  $R = 0.1 \text{ м}$ ,  $\bar{Q}_e = 3.92 \text{ МДж}$ ,  $K_e = 33.2\%$ , для  $R = 0.2 \text{ м}$ ,  $\bar{Q}_e = 9.54 \text{ МДж}$ ,  $K_e = 49.3\%$  и для  $R = 0.4 \text{ м}$ ,  $\bar{Q}_e = 14.92 \text{ МДж}$ ,  $K_e = 71.5\%$ . Но в пересчете на  $1 \text{ м}^3$  бетона такой зависимости не наблюдается: при  $R = 0.1 \text{ м}$ ,  $\bar{Q}'_e = 39.2 \text{ МДж}/\text{м}^3$ , при  $R = 0.2 \text{ м}$ ,  $\bar{Q}'_e = 47.37 \text{ МДж}/\text{м}^3$ , а при  $R = 0.4 \text{ м}$ ,  $\bar{Q}'_e = 37.3 \text{ МДж}/\text{м}^3$ . Это объясняется тем, что габариты определяют не только количественные характеристики бетона, но и температурный режим внутри изделия, качественно изменяя кинетику тепловыделения. Аналогичное влияние на кинетику тепловыделения оказывает и параметр  $\zeta$ . Его

увеличение ведет к повышению участия экзотермии в тепловом балансе: для  $\rho = 330 \text{ кг/м}^3$   $K_3 = 33,5\%$ , для  $\rho = 390 \text{ кг/м}^3$   $K_3 = 40,9\%$  и для  $\rho = 450 \text{ кг/м}^3$   $= 50,5\%$ . Но при этом прямо пропорциональной зависимости типа  $Q_3 = \rho \cdot f(t, \tau)$  (как это принято при аналитическом представлении выделяющейся теплоты) не наблюдается.

2. При тепловом воздействии при сравнении трех марок цемента наиболее активен бетон на цементе БТЦ-500, наименее - на ПЦ-400 (БТЦ-500 -  $\bar{Q}_3 = 7,64 \text{ МДж}$ , ПЦ-500 -  $\bar{Q}_3 = 6,61 \text{ МДж}$ , ПЦ-400 -  $\bar{Q}_3 = 5,04 \text{ МДж}$ ). Но в области температур от  $20^\circ\text{C}$  до  $30^\circ\text{C}$  интенсивность тепловыделения бетона на ПЦ-400 выше, чем на двух других цементах, затем в области температур  $40+80^\circ\text{C}$  становится ниже (рис. 4). Повтому бетоны на БТЦ-500 и ПЦ-500 лучше применять для тонкостенных конструкций при интенсивном прогреве, для Т0 бетонов на ПЦ-400 лучше использовать режимы с плавным набором температуры. При естественном твердении особенно массивного бетона, лучше применять цемент ПЦ-500, т.к. в диапазоне температур  $20+30^\circ\text{C}$  у него самая низкая интенсивность тепловыделения.

3. Чем дольше время предварительной выдержки, тем меньше выделяется в последующем теплоты: при выдержке 2 часа -  $\bar{Q}_3 = 9,2 \text{ МДж}$ , 4 часа -  $\bar{Q}_3 = 6,64 \text{ МДж}$ , 6 часов -  $\bar{Q}_3 = 4,64 \text{ МДж}$ . Поэтому, несмотря на ее благотворное влияние на прочность бетона, ограничивающим фактором ее продолжительности является не только ускорение оборачиваемости, но и сокращение вклада экзотермии, особенно это заметно для массивных изделий.

4. Чем выше температура предварительного прогрева, тем больше в последствии выделяется теплоты экзотермии и тем меньше требуется времени на весь цикл Т0, но при этом возрастают общие затраты теплоты с учетом теплоты предварительного прогрева. При толщине панели  $0,2 \text{ м}$  и  $t_{\text{нн}} = 40^\circ\text{C}$  время подачи теплоты сокращается на 2 часа, а тепловые затраты возрастают на  $8,1\%$ , при  $t_{\text{нн}} = 60^\circ\text{C}$  затраты увеличиваются на  $18,8\%$ , а время сокращается на 5 часов. При Т0 массивных изделий ( $R = 0,4 \text{ м}$ ) при  $t_{\text{нн}} = 40^\circ\text{C}$  время подачи теплоты уменьшается на 6 часов, а тепловые затраты увеличиваются на  $32,2\%$  и соответственно эти величины при  $t_{\text{нн}} = 60^\circ\text{C}$  составляют 12 часов и  $73,3\%$ . Следовательно при применении предварительного прогрева бетона надо исходить из двух факторов: сокращение времени Т0 и потребление меньшего количества теплоты.

5. Скорость набора греющей поверхностью температуры  $80^\circ\text{C}$  при малых толщинах изделий порядка  $0,15 \text{ м}$  практически не влияет на средние уровни температуры в изделиях, т.е. при скоростях от 20

°С/час до 60°С/час время выхода средней температуры на значение 80°С примерно одно и то же. Несколько больше выделяется теплоты при скорости прогрева 60°С/час: при 60°С/час -  $\bar{Q}_3 = 5.27$  МДж, 30°С/час -  $\bar{Q}_2 = 5.16$  МДж и 20°С/час -  $\bar{Q}_1 = 4.61$  МДж. За счет увеличения скорости набора температуры также незначительно уменьшается время подачи теплоты (соответственно 8, 9 и 10 часов), но увеличиваются необходимые мощности внешнего теплового потока (соответственно, 2.21, 1.6, 1.32 кВт/м<sup>2</sup>). При больших толщинах изделий ( $R = 0.4$  м) наиболее выгодна скорость прогрева 20°С/час, т.к. при ней выделяется наибольшее количество теплоты (при 60°С/час -  $\bar{Q}_3 = 11.2$  МДж, при 20°С/час -  $\bar{Q}_1 = 12.6$  МДж), потребляется наименьшее количество теплоты и требуются меньшие мощности (соответственно, 22.2 МДж, 1.15 кВт/м<sup>2</sup> и 23.3 МДж, 1.5 кВт/м<sup>2</sup>) и проявляется самое большое участие экзотермии -  $K_3 = 55.4\%$  (для 60°С/час - 48.5%). При этом средние температуры в изделии и время подачи теплоты практически одинаковые. Следовательно, для изделий толщиной порядка 0.2 м более предпочтительны режимы со скоростью нагрева 20°С/час + 30°С/час, а не форсированные, как это предлагается рядом исследователей. Для массивных изделий оптимальны плавные режимы со скоростью 20°С/час.

6. Температура изотермического прогрева должна определяться средней температурой в изделии, которая зависит от его габаритов, количества и марки цемента. Уже считается установленным тот факт, что для набора прочности бетоном порядка 70+80% достаточно, чтобы средняя температура продержалась на уровне 60+70°С в течении 8+10 часов. Эти же температуры наиболее оптимальны для тепловыделения цементов ПЦ-400, ПЦ-500, БТЦ-500. Так, при изотермическом прогреве бетонной панели толщиной 0.15 м при температуре 80°С выделилось 5.16 МДж теплоты, а при 60°С - 5.85 МДж (рис. 5).

Эти требования к средней температуре бетона могут служить исходными условиями при подборе режимов ТО.

В четвертой главе разработана методика подбора эффективных режимов ТО. Эффективность режима связывалась с понятием оптимальности набора внешних параметров ТО, который бы обеспечивал для определенного бетонного изделия температурные условия для полноценного набора прочности при минимальных затратах теплоты, возможных для данного теплового оборудования. В предыдущей главе было установлено, что для наиболее широко применяемых в конструкционном бетоне параметров изделий наиболее оптимален следующий набор характеристик ТО: начальная температура бетонной смеси 20°С (для  $R =$

0.4 м - 40°C), начальная температура изотермического прогрева - 80°C, скорость набора этой температуры 30°C/час, и дальнейшее поддержание средней температуры изделия на уровне 60°C в течении 8 часов. Для подбора режима подачи теплоты использовался метод псевдообратной задачи теплопроводности. Построение алгоритма численной реализации методики осуществлялось таким образом, что исходными данными служили параметры изделия, окружающей среды, теплового обораудования и набор характеристик Т0. На выходе получали динамику температуры греющей и необогреваемой поверхностей и остальные параметры прогрева ( $Q_f$ ,  $K_f$  и т.д.). При этом в качестве ПЗТ формировалась модель прогрева бетонного образца в лабораторной установке, как и для определения зависимости  $\lambda(t, \tau)$ , но с заданием на необогреваемой поверхности граничных условий III-го рода. При конечно-разностной реализации граничные условия III-го рода аппроксимировались с точностью  $O(\Delta x^2)$ .

Алгоритм состоял из трех частей. Первая - точное назначение температуры греющей поверхности во время подъема температуры; вторая - точное назначение температуры 80°C, пока средняя температура бетона  $t_s$  не станет примерно 55°C, третий - организация поиска значения температуры греющей поверхности из условия  $60^\circ\text{C} \leq t_s \leq 70^\circ\text{C}$ . Как показали расчеты, подачу теплоты можно прекратить, как только температура необогреваемой поверхности достигнет 47°C, а до этого времени поддерживать на греющей поверхности температуру около 80°C. Дальнейшее повышение температуры происходит за счет действия экзотермии. Для сравнения были просчитаны параметры прогрева по режиму 2+10 (два часа - набор температуры 80°C и десять часов - поддержание этой температуры). При управляемом режиме получены следующие параметры:  $Q_f = 14.2$  МДж,  $K_f = 48.6\%$ , а при режиме 2+10:  $Q_f = 17.5$  МДж,  $K_f = 29.4\%$ . Т.е. управляемый режим с точки зрения тепловых затрат оказался выгоднее. Для проверки возможности реализации и набора прочности бетоном этот режим был проверен на лабораторной установке. Для сравнения был проверен режим 2+10. Как видно из рисунка 6 расчетные и экспериментальные температуры необогреваемой поверхности начинают различаться только во время термосного выдерживания. Образцы, подвергнутые Т0 по обоим режимам показали прочность на сжатие более 70% (при управляемом на 8% больше) при меньших тепловых затратах управляемого режима (соответственно, 248 МДж/м<sup>3</sup> и 354 МДж/м<sup>3</sup>). Через 24 часа после распадения прочности соответственно была 87% и 82%.

Из расчетов температурных полей в бетонной панели и при прог-

реве бетонного образца было отмечено две особенности теплопереноса в бетоне: продолжающееся повышение температуры в глубине изделия после прекращения подачи теплоты и уменьшение скорости подъема температуры при поддержании постоянной температуры поверхности. Первое вызвано действием экзотермии и большой объемной теплоемкостью бетона —  $2420 \text{ КДж/м}^3 \cdot \text{К}$ , а второе объясняется выравниванием температур в близлежащих к нагревателю слоях, что уменьшает интенсивность теплового потока внутрь изделия. Учитывая эти два фактора, был предложен прерывистый режим подачи теплоты, при котором температура греющей поверхности поднимается до  $80+85^\circ\text{C}$  за два часа и поддерживается на этом уровне до тех пор пока температура необогреваемой поверхности не станет  $30+35^\circ\text{C}$ , т.е. средняя температура будет  $55+60^\circ\text{C}$ . Затем, когда наступает период максимальной скорости роста температуры необогреваемой поверхности, обогрев отключается до тех пор, пока не начинает уменьшаться скорость подъема ее температуры. После этого включается подача теплоты и как можно быстрее температура греющей поверхности доводится до  $80+85^\circ\text{C}$ . Затем подача теплоты прекращается (рис. 6). Перед действием второго теплового импульса температура греющей поверхности уменьшается, что увеличивает тепловосприятие бетона. На реализацию этого режима было затрачено  $217.6 \text{ МДж/м}^3$  теплоты, т.е. меньше, чем при предыдущих режимах. Образец после ТО показал прочность около 80%, а через 24 часа после распалубливания — 102%. Т.е. при этом режиме не только понижается расход теплоты, но и увеличивается конечная прочность бетона. Предложенный режим послужил основой для авторского свидетельства. В заводских условиях прерывистый режим рекомендуется для контактных способов ТО в закрытых формах — кассетах, термоподдонах, термоформах.

## ВЫВОДЫ

I. Предложенная методика с использованием аппарата обратных задач теплопроводности позволяет на основе измерений температуры во время ТО бетона определить зависимость коэффициента теплопроводности твердеющего бетона от температурно-временного фактора. При определении коэффициента теплопроводности были выявлены следующие особенности: первое — коэффициент теплопроводности изменяется во время твердения; сперва он уменьшается, затем пройдя через минимум увеличивается, после чего его значение становится постоянной величиной; второе — отмечено совпадение времени наступления экстремумов зависимостей  $\lambda(t, \tau)$ ,  $q_0(t, \tau)$  и  $q'_{0c}(t, \tau)$ , т.е. дина-

мика этих величин является следствием протекания одних и тех же процессов - формирования структуры бетона; третье - температурный фактор изменяет динамику  $\lambda(t, \tau)$ , практически не влияя на диапазон его изменения, т.е. эта величина определяется только составом бетона. Следовательно при наличии изотермических зависимостей  $q_2(t, \tau)$  для цемента, входящего в состав бетона можно построить  $\lambda(t, \tau)$  для любого режима ТО. Применение этой методики в расчетах температурных полей при ТО значительно увеличило их точность, что дало возможность в дальнейшем применять их для подбора режимов ТО.

2. Методика оценки вклада экзотермии и вызванного ею прироста температуры, разработанная для анализа влияния тепловыделения бетона на формирование температурных полей при ТО, позволяет рассматривать тепловыделение в общей динамике температур и, тем самым, учитывать взаимное влияние температуры и интенсивности тепловыделения. Рассчитываемые величины  $\bar{Q}_z$ ,  $Q_f$  и введенный коэффициент участия экзотермии -  $K_z$  позволяют оценить эффективность того или иного режима ТО при проведении прогнозирующих расчетов, не смотря на то, что они носят идеализированный характер.

3. На основе многовариантных расчетов по разработанной методике был сформулирован наиболее оптимальный с точки зрения участия экзотермии и минимальности внешних тепловых затрат набор параметров режима ТО: начальная температура бетона для изделий толщиной менее 0.4 м - 20°C, более 0.4 м - 40°C; начальная температура греющей поверхности при изотермическом прогреве - 80°C; скорость набора этой температуры - 30+40°C/час; температура изотермического прогрева на греющей поверхности должна обеспечить среднюю температуру изделия 60+70°C.

4. Методика подбора режимов ТО, включающая рекомендованный набор параметров, благодаря точному учету теплофизических особенностей бетона - нелинейности коэффициента теплопроводности и интенсивности тепловыделения, позволила расчетным путем получить такие значения температур греющей и необогреваемой поверхностей, следование которым с точностью  $\pm 2^\circ\text{C}$  обеспечивает реально осуществимые режимы ТО, тепловые затраты при которых значительно меньше, чем при существующей технологии ТО. В качестве управляющей функции лучше всего выбирать температуру необогреваемой поверхности, или разделительного листа, как наиболее показательной и удобной для измерения температур. Предложенный алгоритм может применяться практически при всех способах ТО (кассетной, термоформах, пропарочных камерах и т.п.).

5. Прерывистый режим подачи теплоты благодаря учету закономерностей динамики нагрева бетона – постепенного уменьшения скорости прогрева и долговременного повышения температуры после отключения подачи теплоты, позволил значительно сократить затраты теплоты по сравнению с режимами с непрерывной подачей теплоты и увеличить не только распалубочную прочность, но и увеличить интенсивность ее роста в последующем.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Шестопалова Т.В., Гламаздин П.М. Методы расчета полей тепломассопереноса в твердеющих бетонных изделиях / Деп. в УкрНИИТИ. – № 3985 УК-Д82. – 12.12.82. – 51 с.

2. Гламаздин П.М., Шестопалова Т.В., Плугин А.Н. К вопросу об учете экзотермии цементов при прогнозировании температурных полей в твердеющих бетонах // Снижение материалоемкости строительства. – Киев: БудІвельник, 1983. – С. 4.

3. Шестопалова Т.В., Гламаздин П.М. К расчету температурных полей в твердеющих бетонных изделиях при их термообработке // Конвективный теплообмен и гидродинамика. – Киев: Наукова думка, 1985. – С. 81–89.

4. Кононенко Г.Н., Ярош Т.В. и др. Об одном эффективном режиме термической обработки изделий в кассетных установках // Строительные материалы и конструкции. – 1988. – № 4. – С. 29–30.

5. Кононенко Г.Н., Ярош Т.В., Кацман Р.А. Оптимальный режим тепловой обработки бетонных изделий // Строительные материалы и конструкции. – 1989. – № 3. – С. 31–32.

6. Кононенко Г.Н., Ярош Т.В. Исследование формирования температурных полей в термopоддоне // Наука и техника в городском хозяйстве. – Киев: БудІвельник, 1989. – № 10. – С. 19–22.

7. Кононенко Г.Н., Ярош Т.В., Лукьянова Л.А. Влияние различных режимов тепловой обработки железобетонных конструкций, изготовляемых в кассетах, на их температурные поля / Деп. в УкрНИИТИ 27.10.89, № 2310-Ук-89. – 8 с.

8. Кононенко Г.Н., Ярош Т.В., Кацман Р.А. Исследование тепловых процессов при формовке строительных конструкций в термopоддонах / Деп в УкрНИИТИ 27.10.89, № 2311-Ук-89. – 10 с.

9. Ярош Т.В., Гламаздин П.М. К вопросу моделирования полей экзотермии в твердеющих бетонных изделиях при их термообработке // Строительные материалы, изделия и санитарная техника. – 1989. – № 12. – С. 73–76.

10. Кононенко Г.Н., Ярош Т.В. Исследования режимов тепло-влажностной обработки бетона // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. - 1991, - № 1. - С. 67-70.

11. Кононенко Г.Н., Ярош Т.В. Об одном экономическом методе тепловой обработки бетона // Пути повышения эффективности и надежности систем теплоснабжения и теплопотребления: Тезисы доклада. (Пенза, 5-6 июня 1989 г.). - Пенза: Приволжский ДНТП, 1989. - С.14.

12. Кононенко Г.Н., Ярош Т.В. Способ тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / Решение о выдаче авторского свидетельства на заявку № 4676208 (019843) от 06.02.89 г.

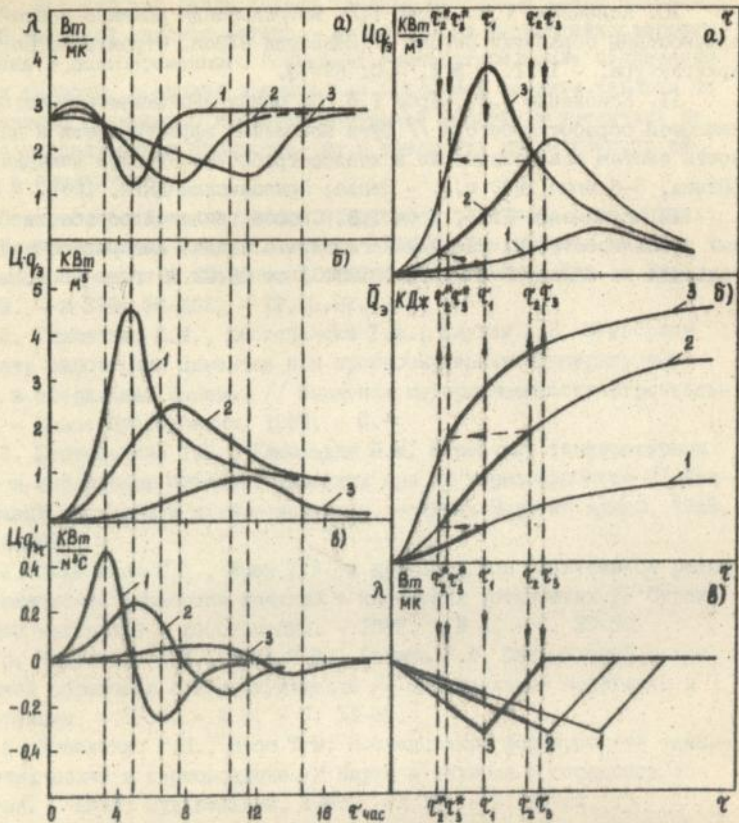


Рис. 1. Взаимосвязь между интенсивностью тепловыделения и коэффициентом теплопроводности. 1 - эксперимент №1, 2 - эксперимент №2, 3 - естественное твердение.

Рис. 2. Построение коэффициента теплопроводности для нестационарных условий по методу равных тепловыделений 1, 2, 3 - изотермические кривые, соответствующие  $\tau_1, \tau_2$  и  $\tau_3$ ;  $\tau_1^0$  - начало соответствующего интервала,  $\tau$  - конец.

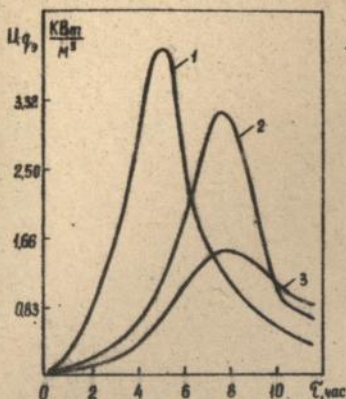


Рис. 3. Среднеобъемная интенсивность тепловыделения  $\Pi=330 \text{ кг/м}^3$ ,  $\Pi\text{I}-500$ . 1- $R=0,1 \text{ м}$ , 2- $R=0,2 \text{ м}$ , 3- $R=0,4 \text{ м}$ .

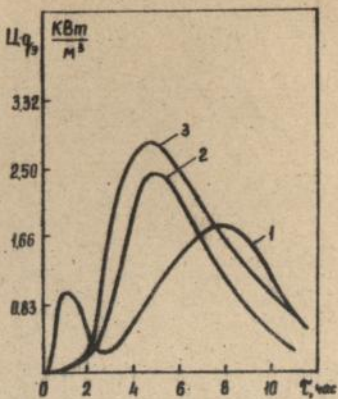


Рис. 4. Среднеобъемная интенсивность тепловыделения 1-цемент  $\Pi\text{I}-400$ , 2-цемент  $\Pi\text{I}-500$ , 3-цемент БТЦ-500.

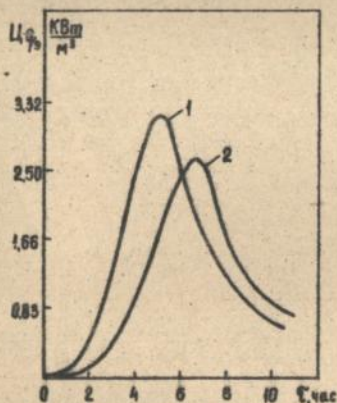


Рис. 5. Среднеобъемная интенсивность тепловыделения  $R=0,15 \text{ м}$ ,  $\Pi=330 \text{ кг/м}^3$ ,  $\Pi\text{I}-500$ . 1-температура изотермического прогрева  $80^\circ \text{ C}$ , 2-температура изотермического прогрева  $60^\circ \text{ C}$ .

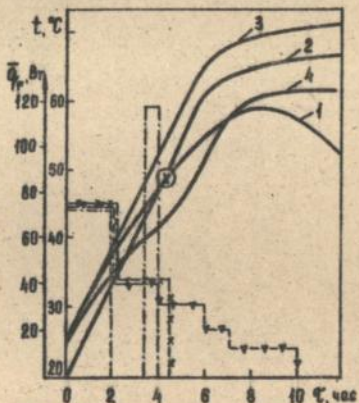


Рис. 6. — температуры необогреваемой поверхности; управляемый режим: 1-экспериментальная, 2-расчетная,  $\odot$ -окончание обогрева, 3-расчетная режим 2+10, 4-прерывистый режим; мощность теплового потока:  $\dashv$ -2+10,  $\dashv$ -управляемый,  $\dashv$ -прерывистый.

Подп. к печ. 02.07.82. Формат 80x84/16. Бумага тип. № 3  
 Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отт. 116  
 Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100  
 Зак. № 4-65. Бесплатно.

РАПО «Укрвуполиграф»  
 252151, г. Киев, ул. Вольнская, 60.

АНБ МД В. П. КОТЛОВНИК  
 ЧНУРС

Ab 25.999  
**Ab 25.999**