

666  
0-66

БЕЛОРУССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. С.М.КИРОВА

На правах рукописи

ОРЛОВИЧ Анна Ивановна

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ НА  
ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА

05.17.11 - Технология силикатных и тугоплавких  
неметаллических материалов

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

М и н с к 1 9 7 9

Работа выполнена в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

- Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент ЛЕБЕДЕВ А.П.
- Официальные оппоненты: член-корреспондент АН ГрУ — зинской ССР, доктор технических наук, профессор МЧЕДИЛОВ-ПЕТРОСЯН О.П.  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник БЛЕЩИК Н.П.
- Ведущая организация — Научно-исследовательский институт строительных материалов МИСМ БССР

Защита диссертации состоится "23" мая 1979 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании специализированного совета К 056.01.04 по присуждению ученой степени кандидата технических наук Белорусского технологического института им. С.М.Кирова (220630, г.Минск-50, ул.Свердлова, 13а).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "19" апреля 1979 года.

Ученый секретарь специализированного совета, кандидат технических наук, доцент

Е.М.ДЯТЛОВА

666  
0-66

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работ. Планами развития народного хозяйства, принятыми XXV съездом КПСС, поставлены конкретные задачи по дальнейшему повышению эффективности и качества строительного производства, успешное решение которых в значительной степени определяется состоянием технологии изготовления строительных материалов, в частности, сборного железобетона.

Важнейшим технологическим процессом изготовления железобетонных изделий является тепловая обработка, которая занимает в общем производственном цикле до 90% времени, требует значительных энергозатрат и оказывает существенное влияние на формирование структуры искусственного камня. Поэтому совершенствование тепловой обработки, направленное на улучшение физико-технических свойств бетона, сокращение ее продолжительности и снижение расхода энергии является актуальной задачей.

Эта проблема может быть решена на основе всестороннего теоретического и экспериментального изучения процессов гидратации вяжущего и взаимодействия твердеющей системы с окружающей средой. Зная эти законы, можно целенаправленно управлять механизмом структурообразования цементного камня и бетона.

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное изучение процесса тепловой обработки тяжелого бетона в сухой среде и разработка на этой основе способа, обеспечивающего получение изделий с требуемыми свойствами при сокращенных сроках твердения и минимальных затратах энергии за счет эффективного использования внутреннего тепловыделения, и внедрение его в производство на предприятиях строительной индустрии.

Методика исследования включала: термодинамическое обоснование основных параметров режима тепловой обработки тяжелого бетона в сухой среде; экспериментальные исследования на лабораторной установке с последующей проверкой основных результатов в производственных условиях на серийных изделиях; математическую обработку результатов эксперимента.

Научная новизна. Разработан метод сравнения различных условий твердения вяжущих, основанный на использовании законов термодинамики необратимых процессов.

5359 up

Предложен новый режим тепловой обработки тяжелого бетона, включающий нагрев в сухой среде со скоростью не более 25 град/ч до оптимальной температуры и выдерживание его в теплоизолированном объеме без подвода теплоты. Такой режим позволяет максимально использовать тепловыделение цемента, сократить сроки твердения и снизить энергозатраты.

Установлены факторы, определяющие интенсивность испарения, и получено выражение для расчета количества испаренной влаги в период нагрева твердеющего цементного камня и бетона в сухой среде при лучистом подводе тепла.

Найдена закономерность изменения продолжительности теплового воздействия на твердеющий цементный камень или бетон в среде с пониженной влажностью в зависимости от скорости нагрева и массивности изделий с учетом массообменных процессов.

Практическая ценность работы и реализация исследований в промышленности. Результаты исследований служат основой для назначения режимов тепловой обработки тяжелого бетона в сухой среде, отличающихся от существующих сокращенными сроками твердения и меньшими затратами энергии. Разработанный режим внедрен в производстве санитарно-технических кабин на заводе железобетонных изделий г. Молодечно МСС БССР. Подтвержденный экономический эффект составил 22,1 тыс.руб. в год. Полупромышленные испытания режима на Случком комбинате сельского строительства на прессованных трубах и плитах покрытий ПР дали положительные результаты. Ожидаемый экономический эффект от его внедрения только в производстве плит покрытий составит 42,6 тыс.руб. в год.

Апробация работы. Основные разделы и работа в целом докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры "Строительная физика и использование тепла в строительном производстве" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института и кафедры "Химическая технология вяжущих материалов" Белорусского технологического института им. С.М.Кирова, на XXXI, XXXII, XXXIII и XXXIV научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава БПИ совместно с работниками промышленности и строительства (1974-1977 гг.); на IX конференции молодых ученых и специалистов Прибалтики и Белоруссии по проблемам строительных материалов и конструкций (1976 г.); на Республикан -

ской конференции молодых ученых и специалистов по проблемам тепло- и массопереноса, посвященной 60-летию образования БССР и КПБ (1978 г.).

**П у б л и к а ц и я.** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 6 печатных работах.

**О б ъ е м р а б о т ы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 170 страницах машинописного текста (из них 45 рисунков и 17 таблиц), списка литературы из 137 наименований и приложений на 6 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации приведен обзор основных работ, посвященных ускоренному твердению вяжущих и бетонов на их основе. Как следует из анализа литературных данных, твердение цементного теста или бетонной смеси представляет собой комплекс сложных физико-химических процессов, приводящих к образованию цементного камня или бетона. Поровая структура, сложившаяся при твердении, определяется составом исходной смеси и характером взаимодействия ее с окружающей средой. Независимо от способа тепловой обработки качество бетона, твердеющего в открытой системе при повышенной температуре, оказывается хуже, чем бетона нормального твердения. Это объясняется различием в количестве и размерах пор и капилляров в готовом продукте. Наибольшие нарушения поровой структуры происходят при тепловлажностной обработке.

Исследованиями Л.Я.Волосяна, Н.Н.Данилова, Н.Н.Куприянова, Л.А.Малининой, М.Т.Солдаткина и других показано, что тепловая обработка в среде с пониженной влажностью позволяет получить бетон с физико-механическими свойствами, приближающимися к свойствам бетона нормального твердения. Это обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, при таком способе тепловой обработки возникают меньшие, чем при пропаривании, и противоположно направленные градиенты температуры и влажности, а, во-вторых, частичное испарение воды затворения, происходящее при нагреве бетона в сухой среде, способствует некоторому уплотнению твердеющей системы и ускоряет образование искусственного камня.

Этот способ тепловой обработки бетона, несмотря на очевидные преимущества перед пропариванием, используется только в производ-

стве изделий из бетонов на пористых заполнителях. Применение его для ускорения твердения тяжелых бетонов наталкивается на ряд трудностей, связанных с возможным обезвоживанием твердеющей системы. Кроме того, еще недостаточно изучены процессы тепло- и массообмена при нагреве в сухой среде и влияние их на степень гидратации цемента.

Традиционные режимы тепловой обработки для интенсификации процессов гидратации предусматривают изотермическое выдерживание изделий с подводом теплоты. В результате температурные и влажностные градиенты, возникающие в период нагрева, сохраняются и вызывают миграцию влаги в твердеющей системе. Как показано в работах О.П.Мчедлова-Петросяна и ряда других авторов, миграция влаги в этот период нежелательна, так как препятствует образованию плотной структуры искусственного камня. Для устранения этого явления необходимо существенно уменьшить процессы массопереноса в системе при сохранении условий ускоренного твердения бетона.

В настоящее время существует целый ряд способов и режимов тепловой обработки бетонных изделий, оценка эффективности которых в связи со сложностью и многогранностью химических и физических процессов, протекающих в цементном тесте и бетонной смеси при твердении, несовершенна, так как она производится на основании сравнения статистических данных (по прочности, морозостойкости, водопоглощению и т.п.), полученных экспериментально в различных друг от друга условиях. Такая оценка не всегда является объективной и полной.

В диссертации на основе анализа литературных данных показано, что наиболее общим методом сравнения способов ускоренного твердения бетона может быть метод, основанный на использовании законов термодинамики необратимых процессов. Он обладает большой общностью, относительно прост и позволяет, не раскрывая внутренней сущности явлений, решить ряд практически важных задач.

На основании изложенного были определены следующие задачи исследования:

- разработать метод сравнения различных способов тепловой обработки с учетом интенсивности, продолжительности и направления тепло- и массообменных процессов при твердении минеральных вяжущих;
- выбрать способ и разработать оптимальный режим тепловой обра-

ботки бетонной смеси на плотных заполнителях, позволяющий сократить сроки твердения и снизить энергозатраты;

изучить кинетику гидратации цемента, деформации и физико-механические свойства бетона при различной интенсивности и продолжительности теплового воздействия;

определить интенсивность испарения и допустимое количество испаряемой влаги из цементного теста и бетонной смеси в процессе тепловой обработки и выявить влияние этих факторов на изменение физико-механических свойств изделий;

произвести проверку разработанного режима тепловой обработки на предприятиях строительной индустрии.

Вторая глава диссертации посвящена развитию метода исследования твердения вяжущих, основанного на законах термодинамики необратимых процессов. Здесь же изложены основные результаты использования этого метода как для сравнительного анализа особенностей твердения цементного камня и бетона в различных условиях, так и для конкретного расчета основных характеристик режима тепловой обработки в сухой среде при лучистом нагреве, учитывающего свойства бетона и параметры изделий.

Твердение вяжущих представляет собой необратимый процесс связывания воды минералами цемента и в силу своей необратимости сопровождается производством энтропии. Процессы гидратации протекают относительно медленно, поэтому для описания их, как показал Н. Пригожин, можно ввести понятие локального равновесия, для которого энтропия является такой же функцией локальных макроскопических переменных, как и для равновесной системы, т.е. определяется формулой Гиббса.

Известно, что изменение энтропии ( $dS$ ) может происходить как за счет развития физико-химических процессов в системе, так и в результате взаимодействия ее с окружающей средой. В работе названо приращение энтропии, обусловленное степенью завершенности гидратации вяжущего, конструктивной составляющей ( $dS_f$ ), а изменение ее, вызванное тепло- и массообменными процессами с окружающей средой – деструктивной ( $dS_q$ ). Тогда полное производство энтропии при упрочнении искусственного камня будет равно

$$dS = dS_f - dS_q. \quad (I)$$

Согласно определению, производство конструктивной составляющей –

щей энтропии является функцией степени гидратации цемента. Так как фазовый и химический состав новообразований, согласно исследованиям М.Венюа, Ю.М.Бутта и ряда других авторов, не зависит от характера взаимодействия системы с окружающей средой, то при одной и той же степени гидратации цемента основным фактором, учитывающим влияние тех или иных условий твердения на физико-механические свойства искусственного камня, является деструктивная составляющая энтропии, величина которой определяется в основном направлением и интенсивностью тепло- и массообменных процессов.

Процесс твердения вяжущих и бетонов на их основе в нормальных условиях протекает без подвода тепла извне и существенного массообмена с окружающей средой. Изменение деструктивной составляющей энтропии происходит только за счет внутреннего тепловыделения ( $dq_f$ ) и определяется как количеством, так и распределением его на нагрев ( $dq_H$ ) системы и потери в окружающую среду ( $dq_{fH}$ ).

$$dS_q^H = \frac{1}{T} (dq_f - dq_{fH}) = \frac{1}{T} [(dU + PdV) - dq_{fH}], \quad (2)$$

где  $U$  - внутренняя энергия,  $P$  - давление,  $V$  - объем.

При тепловлажностной обработке цементное тесто или бетонная смесь представляет собой открытую термодинамическую систему, которая обменивается теплотой и массой с окружающей средой. В этом случае производство деструктивной составляющей энтропии увеличивается за счет внешнего подвода теплоты  $dq_e$  и теплоты, вносимой конденсатом  $Hdm_k$ , т.е.

$$dS_q^n = \frac{1}{T} (dq_e + Hdm_k + dq_f). \quad (3)$$

В сухой среде часть подведенного тепла расходуется на испарение некоторого количества воды затворения  $zdm_u$  и выражение (3) принимает вид:

$$dS_q^c = \frac{1}{T} [(dq_e - zdm_u) + dq_f]. \quad (4)$$

Из анализа выражений (2)-(4) следует, что наименьшее производство деструктивной составляющей энтропии имеет место при нормальном твердении вяжущих. Следовательно, термодинамический анализ подтверждает известное положение о том, что для твердения цемент-

ного камня нормальные условия являются одновременно и оптимальными. С другой стороны, поскольку  $dS_q'' > dS_q^c$ , то при тепловой обработке в сухой среде создаются более благоприятные условия для твердения системы, чем при пропаривании.

Как указывалось выше, при нагреве бетонной смеси или цементного камня в сухой среде происходит испарение воды затворения. Это приводит к снижению деструктивных процессов, способствует некоторому уплотнению системы и ускоряет твердение вяжущих. Однако чрезмерное удаление влаги может привести к снижению физико-механических свойств бетона из-за неполноты прохождения реакций гидратации. Поэтому при тепловой обработке в среде с пониженной влажностью ( $\varphi = 5-10\%$ ,  $T_c > 373^\circ\text{K}$ ) необходимо на всех стадиях ее учитывать и управлять процессами массообмена.

Расчет количества влаги, удаляемой с единицы поверхности в период нагрева твердеющей системы, можно произвести путем интегрирования по времени выражения для интенсивности испарения, полученного Станецкой И.И.

$$M_{\text{из}} = \int_0^{\tau} q_m d\tau = \int_0^{\tau} A \exp\left[-\frac{\gamma}{RT(\tau)}\right] d\tau, \quad (5)$$

где  $A$  — коэффициент, учитывающий влажностное состояние, пористость и другие характеристики твердеющей системы,  $R$  — газовая постоянная.

Поскольку  $A$  слабо зависит от времени, то его можно вынести из-под знака интеграла. Кроме того, с достаточной степенью точности можно принять, что теплота парообразования

$$\gamma = \gamma_0 - \beta(T - T_0). \quad (6)$$

В большинстве реализуемых в практике случаев при нагреве изменение температуры поверхности твердеющей системы  $T_n$  происходит по закону, близкому к линейному, т.е. можно положить

$$T_n = T_0 + \nu\tau. \quad (7)$$

В выражениях (6) и (7) обозначено:  $\gamma_0$  — теплота парообразования при начальной температуре  $T_0$ ;  $\nu$  — скорость нагрева;  $\beta$  — величина, показывающая изменение теплоты парообразования при повышении температуры на  $1^\circ\text{K}$ .

Подставив (6) и (7) в (5) и проведя ряд преобразований, можно получить

$$M_u = A \frac{1}{b} \exp\left(\frac{\beta}{R}\right) \left\{ \frac{z_0 + \beta T_0}{R} \left[ E_i\left(-\frac{z_0 + \beta T_0}{RT}\right) - E_i\left(-\frac{z_0 + \beta T_0}{RT_0}\right) \right] + T \exp\left(-\frac{z_0 + \beta T_0}{RT}\right) - T_0 \exp\left(-\frac{z_0 + \beta T_0}{RT_0}\right) \right\}. \quad (8)$$

Здесь  $E_i(-x)$  — интегральная показательная функция.

Как следует из (8), количество испаренной влаги зависит от скорости нагрева, температуры и эффективности массообменной поверхности, учитываемой коэффициентом  $A$ . Ввиду того, что этот коэффициент является функцией многих факторов, то аналитический расчет его не представляется возможным. Поэтому для определения

необходимо сопоставить экспериментальные данные по количеству испаренной влаги с расчетными по выражению (8). Это позволит количественно описать интенсивность массообмена при нагреве лучистым потоком цементного теста или бетонной смеси в сухой среде.

Полученная зависимость  $M_u = f(T, b)$  была использована для расчета производства деструктивной составляющей энтропии, обусловленной процессами расширения жидкой и газообразной фаз при нагреве твердеющей системы. Количество теплоты, подводимое к твердеющей системе (если пренебречь тепловыделением в ней), равно

$$Q = c\rho V(\bar{T} - T_0), \quad (9)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность;  $\bar{T}$  — средняя по сечению тела температура.

Для вычисления  $\bar{T}$  воспользовались решением уравнения теплопроводности при граничных условиях первого рода, когда тело нагревается от  $T_0$  до  $T$  с постоянной скоростью  $b$ . После ряда преобразований изменение деструктивной составляющей энтропии может быть представлено в виде

$$\Delta S_q = \frac{1}{T_0} \left\{ cV\rho \left[ bT - \frac{b^2 h^2}{3a} \left( 1 - 3 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{l+1}}{\delta_l^4} \sin \delta_l \exp\left(\delta_l^2 \frac{\alpha T}{h^2}\right) \right) \right] - (z_0 - \beta bT) \frac{A}{b} \exp\left(\frac{\beta}{R}\right) \left\{ \frac{z_0 + \beta T_0}{R} \left[ E_i\left(-\frac{z_0 + \beta T_0}{R(T_0 + bT)}\right) - E_i\left(-\frac{z_0 + \beta T_0}{RT_0}\right) \right] + \right. \right. \quad (10)$$

$$\left. + (T_0 + b\tau) \exp\left(-\frac{\tau_0 + \beta T_0}{R(T_0 + b\tau)}\right) - T_0 \exp\left(-\frac{\tau_0 + \beta T_0}{RT_0}\right) \right\},$$

где  $2h$  — толщина изделия,  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности,  $\delta_c$  — корни характеристического уравнения.

При назначении режимов тепловой обработки конкретных изделий наиболее важными являются скорость нагрева  $b$  и продолжительность теплового воздействия  $\tau$ . Связь между ними можно установить из уравнения (10), если наложить дополнительное наиболее естественное с термодинамической точки зрения требование  $dS_q = 0$ . Момент времени, при котором деструктивная составляющая энтропии стремится к нулю, соответствует предельному времени теплового воздействия в сухой среде, так как дальнейший подвод теплоты повлечет интенсивное испарение влаги и, как следствие, приведет к обезвоживанию твердеющей системы и недобору прочности.

Из уравнения (10) при  $dS_q = 0$  следует, что с увеличением скорости нагрева продолжительность теплового воздействия уменьшается по кривой гиперболического типа, причем, конкретный вид этой зависимости определяется значениями параметров  $h$ ,  $c\rho V$ ,  $\alpha$ ,  $A$ . В частности, увеличение теплоемкости или массивности изделий при заданном  $b$  приводит к линейному возрастанию времени их нагрева.

В третьей главе приведено обоснование режима тепловой обработки тяжелого бетона в сухой среде, сформулированы задачи экспериментальных исследований, описаны экспериментальная установка и методики отдельных измерений, приведены составы и характеристики исходных материалов и сделан анализ погрешностей измерений.

Термодинамический анализ способов тепловой обработки с учетом тепло- и массообменных процессов показал, что наиболее благоприятные условия твердения создаются при нагреве бетонной смеси в сухой среде. Чтобы полнее использовать преимущества этого способа, необходимо выбрать оптимальные параметры процесса твердения, к которым относятся конечная температура  $T_n$ , скорость  $b$  и продолжительность  $\tau$  нагрева и условия последующего выдерживания системы.

Конечная температура нагрева оказывает существенное влияние не только на скорость гидратации, но и на массообменные процессы, поэтому выбор оптимальной  $T_n$  очень важен. Аналитический расчет ее затруднителен. Однако эту трудность можно обойти, если воспользоваться уравнением (10) при  $\Delta S_q = 0$  и привлечь опытные данные по продолжительности теплового воздействия  $\tau$ .

Согласно принципу Ле-Шателье подвод тепла к твердеющей системе в период максимального тепловыделения вызывает торможение реакций гидратации. Как следует из работ О.П.Мчедлова-Петросяна и его школы, а также из целого ряда работ других авторов, для наиболее распространенных портландцементов и стандартных условий тепло-влажностной обработки максимальное тепловыделение при температуре  $343-353^\circ\text{K}$  наступает через 2-3 ч. Поэтому в работе принято, что продолжительность теплового воздействия на твердеющую систему не должна превышать  $\tau = 2+3$  ч. С учетом изложенного из выражения (10) при  $\Delta S_q = 0$  и заданных параметрах системы можно определить скорость нагрева. Из расчетов следует, что для изделий толщиной 0,1-0,2 м с открытой поверхностью испарения скорость нагрева в сухой среде не должна превышать  $20+25$  град/ч, а конечная температура  $348-353^\circ\text{K}$ . После нагрева твердеющей системы необходимо создать такие условия, при которых гидратация развивалась бы с достаточной скоростью (т.е. поддерживать требуемую температуру), а массообмен с окружающей средой был бы существенно замедлен или исключен вообще. Это достигается выдерживанием изделия после нагрева в теплоизолированном объеме с малоподвижной воздушной средой, температура которой ниже температуры бетона. При хорошей теплоизоляции, предотвращающей быстрое охлаждение цементного камня и бетона, процессы гидратации цемента будут протекать достаточно интенсивно, а массообмен практически прекратится.

Для проверки теоретических расчетов и изложенных выше положений изучались тепло- и массообменные процессы, кинетика и степень гидратации цемента, физико-механические свойства цементного камня и бетона. При этом использовались, как правило, наиболее надежные и точные методики измерений.

Исследования проводились на разработанной и созданной экспериментальной установке, в которую входят: 1) камера с двумя параллельно расположенными электроиндукционными нагревателями, которые позволяли создавать одномерный тепловой поток; 2) регулирующая и

контрольно-измерительная аппаратура, предназначенная для поддержания необходимых параметров нагрева и непрерывного измерения в процессе тепловой обработки температуры среды и твердеющей системы, а также изменения ее массы; 3) теплоизолированная камера для выдерживания образцов после нагрева.

В экспериментах использовались цементное тесто с  $V/C = 0,876$  Кнг - 1,4 Кнг и бетонная смесь на плотных заполнителях с  $V/C = 0,38 - 0,60$ . Для их приготовления применялся портландцемент М400 Кричевского завода (Кнг = 0,26), песок Минских карьеров ( $M_{кр} = 2,9 - 3,1$ ), щебень гранитный фракций 5-10 мм Новоград - Волынского месторождения.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований температурных и влажностных полей в образцах твердеющего цементного камня и бетона, интенсивности испарения и количества испаренной влаги в период нагрева лучистым потоком и последующего выдерживания в различных условиях. Кроме того, изучены кинетика и степень гидратации цемента, основные физико-механические свойства и деформации тяжелого бетона при тепловой обработке в сухой среде.

Исследования тепло- и массообменных процессов в период нагрева цементного теста позволили установить, что интенсивность испарения  $Q_m$  зависит не только от температуры поверхности  $T_p$ , но и от скорости нагрева  $\dot{v}$  (рис. 1). Причем по мере повышения скорости нагрева интенсивность испарения влаги с единицы поверхности возрастает. Как показало определение влагосодержания по сечению образцов, наиболее вероятной причиной этого является увеличение эффективной площади испарения за счет обезвоживания крупных капилляров и обнажения устьев мелких в поверхностных слоях образцов. В результате сопоставления экспериментальных значений  $Q_m$  с рассчитанными по формуле (5) установлено, что, как и предполагалось при расчете количества испаренной влаги из твердеющей системы, коэффициент  $A$  при постоянной скорости нагрева не зависит от температуры.

Важнейшей интегральной характеристикой процессов массообмена является количество испаренной влаги  $M_u$ . Экспериментальными измерениями доказано, что зависимость  $M_u$  от  $T$  и  $\dot{v}$  носит экспоненциальный характер, причем имеет место хорошее совпадение с результатами расчета по формуле (8) (рис. 2).

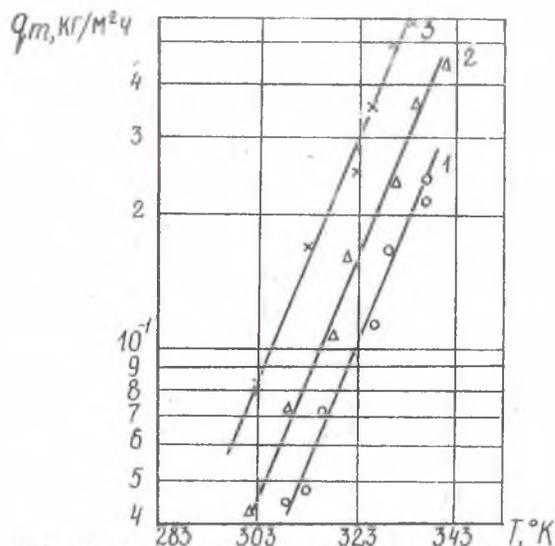


Рис. 1. Зависимость интенсивности испарения влаги от температуры поверхности цементного теста при нагреве со скоростью: 1-18 град/ч; 2-25 град/ч; 3-35 град/ч

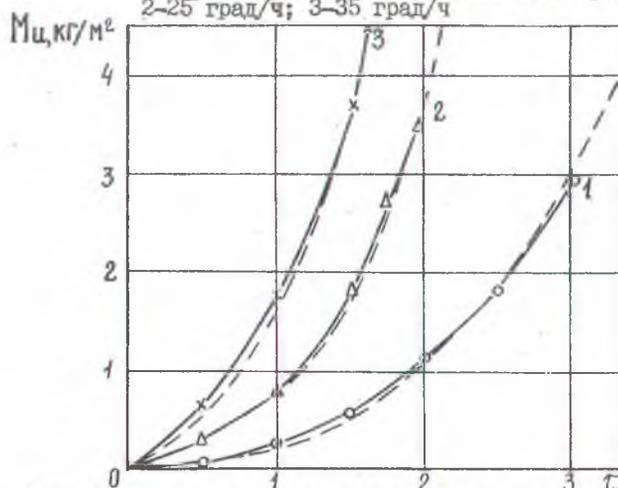


Рис. 2. Потери влаги при нагреве цементного теста в сухой среде со скоростью: 1-18 град/ч; 2-25 град/ч; 3-35 град/ч; — экспериментальные данные, - - - расчетные

Для изучения влияния параметров среды в период выдерживания твердеющей системы на характер протекания массообменных процессов и проверки предположений по этому вопросу, изложенных в главе 3, часть образцов выдерживали в разогретой камере, а часть — в теплоизолированном объеме без подвода тепла с температурой среды ниже температуры цементного теста. Установлено, что в первом случае интенсивность испарения влаги значительно выше, чем при выдерживании в теплоизолированном объеме (рис. 3). Причем четко прослеживается связь между скоростью нагрева  $\dot{v}$  в первый период и  $q_m$  во втором, а именно: чем выше  $\dot{v}$ , тем больше потери влаги при выдерживании твердеющей системы в разогретой камере.

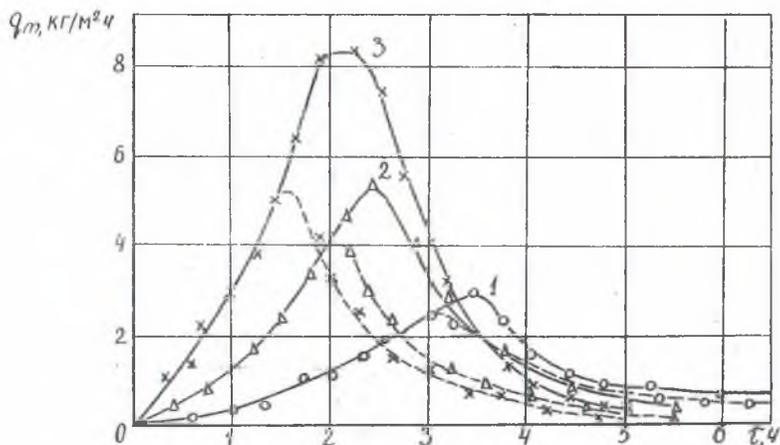


Рис. 3. Интенсивность испарения воды затворения из цементного теста при нагреве со скоростью: 1—18 град/ч; 2—25 град/ч; 3—35 град/ч и последующем выдерживании в ————— разогретой камере; — — — — — теплоизолированном объеме

Выдерживание цементного теста в теплоизолированном объеме резко меняет характер тепло- и массообмена. Интенсивность испарения в этом случае значительно уменьшается по сравнению с периодом нагрева, хотя температура образцов продолжала расти за счет внутреннего тепловыделения. Количество испаренной влаги не зависит от скорости нагрева и практически одинаково для всех исследованных режимов (~ 14% от массы воды затворения). Снижение интенсивно-

сти испарения приводит к выравниванию влажностного градиента по сечению и уменьшению скорости миграции влаги. Последнее способствует созданию оптимальных условий для гидратации цемента и формированию плотной структуры.

Результаты исследований влияния скорости нагрева в сухой среде при лучистом подводе теплоты на степень гидратации цемента и структурно-механические свойства цементного камня приведены в табл. I. Установлено, что значительные потери влаги (до 35%) снижают степень гидратации цемента, увеличивают кажущуюся интегральную пористость и количество крупных пор. Прочность цементного камня, подвергнутого нагреву в сухой среде со скоростью 35 град/ч, оказалась наименьшей сразу после тепловой обработки, а в 28-суточном возрасте - примерно на 25% ниже прочности камня нормального твердения. Наиболее оптимальным режимом, обеспечивающим получение цементного камня с высокими физико-механическими свойствами при сокращении срока твердения, является режим 2.

По аналогичным режимам обработки образцы из тяжелого бетона при широком варьировании составов бетонной смеси. В результате установлено, что, как и для цементного теста, оптимальная скорость нагрева бетонной смеси составляет  $v = 25$  град/ч. При этом бетон, обработанный по режиму: нагрев - 2,5 ч и выдерживание в теплоизолированном объеме с  $T_c < T_n$  в течение 3,5 ч, имел прочность в первые сутки 50-55%  $R_{28}^{нтв}$ , а в 28-суточном возрасте - 95-98%  $R_{28}^{нтв}$ . Наличие достаточного количества влаги в бетоне после тепловой обработки способствовало дальнейшей гидратации цемента. Прочность образцов в возрасте одного года достигла 1,6  $R_{28}^{нтв}$ .

Требуемые физико-технические свойства тяжелого бетона, подвергнутого тепловой обработке по разработанному режиму, обусловлены, как показали исследования, меньшими, чем при пропаривании, нарушениями структуры в период нагрева за счет частичного испарения воды затворения и сведения к минимуму массообменных процессов в период упрочнения искусственного камня.

Таким образом, полученные экспериментальные данные по оптимизации скорости и продолжительности нагрева в сухой среде находятся в хорошем соответствии с расчетами и рассуждениями, изложенными в главах 2 и 3.

Пятая глава диссертации включает результаты

Таблица I  
Структурно-механические свойства цементного камня (В/Ц = Ккг)

№ пп.	Режим: нагрев + выдерживание в теплоизолированном объеме, ч	Скорость нагрева, град/ч	Потери влаги, % от воды затворения	Кол-во прочно связанной влаги, % сразу после т.о.	Структурные характеристики в возрасте 28 суток	Прочность при сжатии через сутки, МПа/%								
							W <sub>пор</sub> , %	λ	α	λ	α	λ	α	
I	3,0 + 3,5	18	24	8,9	11,8	14,8	1,1	0,65	38,0	47,0	57,0	62,0	77,7	94,2
2	2,0 + 3,5	25	7	8,4	11,4	14,6	0,98	0,65	37,5	49,5	58,1	62,0	81,8	96,0
3	1,5 + 3,5	35	34	6,8	9,9	16,3	1,3	0,5	31,2	43,0	45,0	51,6	71,0	74,3
4	пропаривание по режиму 2+3+6+2	18	-	9,2	13,7	15,5	1,25	0,48	41,0	47,0	53,0	67,8	71,7	87,6
5	нормальное твердение	-	-	-	10,8	14,5	1,05	0,72	10,9	40,7	60,5	18,0	67,3	100,0

промышленных исследований предлагаемого режима тепловой обработки тяжелого бетона на предприятиях строительной индустрии.

Режим проверялся на разопалубленных с обеих сторон бетонных пресованных трубах диаметрами 250, 400 и 1000 мм с толщиной стенки 29, 36 и 90 мм соответственно, плитах покрытий типа ПР на Слуцком комбинате сельского строительства и санитарно-технических кабин на заводе ЖБИ г. Молодечно. Основные физико-технические свойства изделий, обработанных по предложенному режиму, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Прочность, остаточная влажность и водопоглощение бетонов

Вид изделий	В/Ц	Мар-ка бетона	Прочность при сжатии $R_{сж}$ через сутки		Ост. влаж. %	Водопоглощение, %	
			4 ч после т.о.	I 28			
Трубы бетонные	0,3	300	55-60	60-65	95	2,5-3	7,0
Плиты покрытий типа ПР	0,4	300	50-55	65-70	94-96	3,5	4,2
Санитарно-технические кабины	0,7	200	50-60	65-70	98-100	4,5	5,5

Проведенные работы показали высокую эффективность использования разработанного режима для ускорения твердения тяжелого бетона. Внедрение его в производство санитарно-технических кабин на заводе ЖБИ г. Молодечно позволило увеличить производительность технологической линии в 1,4 раза и снизить энергозатраты в 2,5 раза. Экономический эффект составил 22,1 тыс. руб. в год.

На Слуцком ССК внедрение данного режима позволит сократить продолжительность производственного цикла, снизить энергозатраты на 30-40% и повысить качество выпускаемых изделий. Экономическая эффективность при этом составит 42,6 тыс. руб. в год.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании теоретических и экспериментальных исследований процесса твердения цементного камня и тяжелого бетона в сухой среде и проверки в заводских условиях полученных результатов сделаны

следующие выводы и заключения.

1. Исходя из законов термодинамики необратимых процессов разработан метод сравнения различных способов тепловой обработки бетонных изделий. Показано, что при нагреве цементного теста или бетонной смеси в среде с пониженной влажностью ( $\varphi = 5-10\%$  и  $T_c > 373^\circ\text{K}$ ) создаются более благоприятные условия для формирования и упрочнения структуры искусственного камня, чем при пропаривании.

2. Теоретически получена и экспериментально подтверждена полуэмпирическая зависимость количества испаренной влаги при нагреве твердеющей системы в сухой среде от скорости нагрева, температуры и эффективности массообменной поверхности изделия.

3. Установлена закономерность изменения продолжительности теплового воздействия на твердеющий цементный камень и бетон в сухой среде в зависимости от скорости нагрева и массивности изделий с учетом массообменных процессов.

4. Показана целесообразность прекращения теплового воздействия на твердеющую систему до наступления кристаллизационного упрочнения структуры, что позволяет использовать теплоту гидратации для интенсификации процессов твердения и снизить расход энергии.

5. На основании теоретических и экспериментальных исследований предложен способ тепловой обработки тяжелого бетона в сухой среде и разработан режим, включающий в себя нагрев со скоростью не более  $25^\circ\text{C}/\text{ч}$  в течение  $2,0-3,0$  ч и последующее выдерживание в теплоизолированном объеме с  $T_c < T_n$  без подвода теплоты. Снижение интенсивности внешнего массообмена в период упрочнения кристаллизационной структуры позволяет получать искусственный камень с требуемыми физико-механическими свойствами. Показана возможность применения данного способа тепловой обработки для изделий с большим модулем открытой поверхности и низким начальным влагосодержанием.

6. Экспериментально доказано, что частичное испарение воды затвердения из твердеющей системы в период нагрева способствует формированию более плотной структуры цементного камня, характеризующейся меньшим количеством крупных пор и лучшей их однородностью по размерам в сравнении с пропаренными образцами.

7. Установлено, что процессы гидратации цемента при твердении искусственного камня по разработанному режиму протекают полно и с

достаточной скоростью. Степень гидратации вяжущего оказалась выше, чем при нормальном твердении, и ниже, чем при пропаривании.

8. Физико-механические свойства цементного камня и бетона, прошедших тепловую обработку по предлагаемому режиму, приближаются к свойствам искусственного камня нормального твердения. Прочность бетона в суточном возрасте после тепловой обработки в течение 5,5-6 ч составила 55-65%  $R_{28}^{нтв.}$ , а к 28-ми суточному возрасту оказалась близкой к прочности бетона нормального твердения (95-98%  $R_{28}^{нтв.}$ ) и выше, чем пропаренного бетона. Остаточные деформации образцов за счет частичных потерь воды затворения в первый период тепловой обработки значительно меньше, чем при тепловлажностной обработке.

9. Предлагаемый режим тепловой обработки внедрен на заводе ЖБИ г. Молодечно Минсельстроя БССР в производстве сантехкабин, при этом получен годовой экономический эффект в сумме 23,1 тыс. руб. Промышленная проверка данного режима на Слуцком комбинате сельского строительства показала возможность и целесообразность его применения для ускорения твердения плит покрытий типа ПР и бетонных пресованных труб. Ожидаемый экономический эффект только при производстве плит ПР составит 42,6 тыс.руб. в год.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Лебедев А.П., Орлович А.И. О степени гидратации цемента в цементном тесте при тепловой обработке в камере с теплоизлучающими поверхностями. -Строительство и архитектура, Известия вузов, № 9, - Новосибирск, 1976, с. 88-90.

2. Лебедев А.П., Орлович А.И. Выбор режима тепловой обработки тяжелого бетона в сухой среде. В сб.: Тепловая обработка бетона на предприятиях сборного железобетона БССР, вып. 13. Минск, 1977, с. 72-78.

3. Лебедев А.П., Станецкая И.И., Кмит И.Ф., Орлович А.И. Тепловая обработка железобетонных звеньев труб в установке с теплоизлучающими поверхностями. В сб.: Тепловая обработка бетона на предприятиях сборного железобетона БССР, вып. 13. Минск, 1977, с. 67-71.

4. Лебедев А.П., Орлович А.И. Термодинамические особенности

твердения минеральных вяжущих в различных условиях. — Тезисы докладов IX конференции молодых ученых и специалистов Прибалтики и Белоруссии по проблемам строительных материалов и конструкций. — Минск, 1977, с. 9.

5. Орлович А.И. Тепловая обработка изделий из жестких бетонных смесей в сухой среде.—Тезисы докладов IX конференции молодых ученых и специалистов Прибалтики и Белоруссии по проблемам строительных материалов и конструкций. — Минск, 1977, с. 36.

6. Станяк В.И., Скалабан С.В., Лебедев А.П., Орлович А.И. Исследование влияния водоцементного отношения на степень гидратации цемента в цементном камне. — Материалы VII конференции лауреатов республиканского смотра-конкурса научных работ студентов вузов БССР по естественным, техническим и гуманитарным наукам. Часть I. — Минск, 1977, с. 25-26.

Анна Ивановна ОРЛОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ  
НА ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА

05.17.11 - Технология силикатных и тугоплавких  
неметаллических материалов

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Редактор Л.В.Иванова

---

Подписано в печать 11.04.79. АТ 01938.

Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага т. № 2.

Усл.-печ.л. 1,16. Уч.-изд.л. 0,9 .Тир. 100. Зак. 570. Бесплатно.

---

Отпечатано на ротационной машине БИ. 220027, Минск, Ленинский пр., 65.