

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ПРОГРЕВА НА ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ГИДРАТИРУЮЩИХ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

И. П. Павлова¹, Г. В. Сырица², А. И. Сырица³

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов УО «БрГТУ», Брест, Беларусь, pavlinna@tut.by

² К. т. н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов УО «БрГТУ», Брест, Беларусь

³ Инженер-технолог, РУП «Сертис», Брест, Беларусь

Реферат

Проведенные в работе как теоретические, так и практические исследования выявили преимущество предлагаемого способа тепловой обработки и показали возможности улучшения структурных характеристик бетона при тепловой обработке в среде с пониженной влажностью ($\gamma = 5-10\%$) при условии покрытия открытых поверхностей бетона пленкообразующими составами и уменьшения напряженного состояния при тепло- и массообменных процессах по сравнению с тепловой обработкой в среде влажного насыщенного пара.

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, возможное частичное испарение воды затвердения в начальный период способствует некоторому уплотнению твердеющей системы и ускоряет образование искусственного камня.

Физико-механические свойства бетона, прошедшего тепловую обработку по предлагаемому режиму, приближаются к свойствам искусственного камня нормального твердения.

Показана возможность применения данного способа тепловой обработки для изделий с большим модулем открытой поверхности и низким начальным влагосодержанием, а также с повышенными требованиями по долговечности.

Ключевые слова: сборный железобетон, инфракрасный прогрев, тепловлажностная обработка.

EXPERIMENTAL-THEORETICAL RESEARCH OF IR HEATING INFLUENCE ON MAIN PROPERTIES OF HYDRATED CEMENTITIOUS SYSTEMS

I. P. Pavlova, G. V. Syritsa, A. I. Syritsa

Abstract

The theoretical and practical studies carried out in the study revealed the advantage of the proposed method of heat treatment. It showed the possibility of improving the structural characteristics of concrete during heat treatment in an environment with low humidity ($\gamma = 5-10\%$) provided that the open surfaces of the concrete are coated with film-forming compounds and the stress state is reduced during heat and mass transfer processes (in comparison with heat treatment in a medium of moist saturated steam).

This is due to two circumstances. Firstly, with this method of heat treatment, smaller and oppositely directed gradients of temperature and humidity arise. Secondly, the possible partial evaporation of mixing water in the initial period contributes to some consolidation of the hardening system and accelerates the formation of artificial stone.

The physical-mechanical properties of the concrete that has undergone heat treatment according to the proposed regime are close to the properties of artificial stone of «normal» hardening.

The possibility of using IR heat treatment method for structures with a large open surface modulus and low initial moisture content, as well as with increased requirements for durability, is shown.

Keywords: prefabricated reinforced concrete, infrared heating, steam treatment.

Введение

В соответствии с «Концепцией снижения материалоемкости и энергоемкости, повышения качества, надежности и сокращения сроков строительства на основе совершенствования индустрии сборного железобетона» основными направлениями в производстве является оптимизация структуры бетонов и технологических процессов изготовления изделий.

Достаточно важную роль в производстве продукции играет тепловая обработка. Именно при тепловлажностной обработке можно выявить такие факторы современного производства бетонных изделий, как повышение качества продукции, увеличение выпуска изделий за счет повышения производительности агрегатов, обеспечение экономии энергетических ресурсов.

Основным теплоносителем в технологическом процессе тепловлажностной обработки строительных материалов в настоящее время является насыщенный водяной пар. Коэффициент его полезного использования достаточно низок, а удельные расходы велики. Поэтому важным является совершенствование систем и оборудования, использующих водяной пар для тепловой обработки изделий, а также, как показывают работы последних лет, переход на беспаровые методы тепловой обработки. Одним из таких методов является

прогрев бетона инфракрасными лучами. Сущность такого способа термообработки бетона заключается в использовании тепловой энергии, выделяемой инфракрасными излучателями и направленной на открытые или опалубленные поверхности обогрева.

Известно, в процессе твердения фазовый и химический состав новообразований 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 в основном направление и интенсивность 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.

При тепловлажностной обработке водяным паром бетонная смесь представляет собой открытую термодинамическую систему, которая обменивается теплом и массой с окружающей средой. При этом возникающие градиенты температуры и влагосодержания по сечению тела приводят к увеличению общей пористости бетона и развитию напряженного состояния в нем.

В случае прогрева бетона инфракрасным излучением последнее глубоко проникает в массу бетона и локализуется в объеме, ограниченном опалубкой, за счет чего достигается экономичность процесса по сравнению с пропариванием, а равномерность прогрева исключает возникновение внутренних напряжений за счет градиента температуры и влагосодержания.

Так как быстрый прогрев бетона при этом приводит к интенсивному испарению из него влаги, то целесообразным является применение пленкообразующих материалов, которые наносятся путем равномерного распыления на поверхность свежеформованного бетона.

Теоретические предпосылки

Твердение вяжущих можно представить как необратимый процесс связывания воды минералами цемента, который в силу своей необратимости сопровождается производством энтропии. Процессы гидратации протекают относительно медленно, поэтому для их описания можно ввести понятие локального равновесия, для которого энтропия является такой же функцией локальных макроскопических переменных, как и для равновесия системы, т. е. определяется формулой Гиббса [1].

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. Приращение энтропии, обусловленное степенью завершенности гидратации вяжущего, является конструктивной составляющей (dS_f), а изменение ее, вызванное тепло- и массообменными процессами с окружающей средой, – деструктивной (dS_g). Тогда полное производство энтропии при упрочнении цементного камня будет равно:

$$dS = dS_f - dS_g. \quad (1)$$

Производство конструктивной составляющей энтропии является функцией степени гидратации цемента. При этом при одной и той же степени гидратации цемента основным фактором, учитывающим влияние условий твердения на итоговые физико-механические свойства цементного 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 (dg_f) и определяется как количеством, так и распределением его на нагрев (dg_{in}) системы и потери в окружающую среду (dg_{fin}).

$$dS_g^H = \frac{1}{T} (dg_f - dg_{fin}) = \frac{1}{T} ((dU + PdV) - dg_{fin}), \quad (2)$$

где U – внутренняя энергия, P – давление, V – объем.

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

$$dS_g^H = \frac{1}{T} (dg_i + Hdm_k + dg_f). \quad (3)$$

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

$$dS_g^C = \frac{1}{T} ((dg_i - rdm_u) + dg_f). \quad (4)$$

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 цементного камня нормальные условия являются одновременно и оптимальными. С другой стороны, поскольку $dS_g^H > dS_g^C$, то при тепловой обработке в сухой среде создается 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 реакции гидратации. Поэтому при тепловой обработке в среде с пониженной влажностью ($\varphi = 5-10\%$, $T_c > 373 \text{ K}$) 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.:

$$M_u = \int_0^{\tau} q_m d\tau = \int_0^{\tau} A \exp\left(-\frac{r}{RT(\tau)}\right) d\tau, \quad (5)$$

где A – коэффициент, учитывающий влажностное состояние, пористость и другие характеристики твердеющей системы;

R – газовая постоянная.

Проведя ряд преобразований, можно получить:

$$M_u = A \frac{1}{b} \exp\left(\frac{\beta}{R}\right) \left\{ \frac{r_0 + \beta \cdot T_0}{R} \left[E_i\left(-\frac{r_0 + \beta \cdot T_0}{RT}\right) - E_i\left(-\frac{r_0 + \beta \cdot T_0}{RT_0}\right) \right] + T \exp\left(-\frac{r_0 + \beta \cdot T_0}{RT}\right) - T_0 \exp\left(-\frac{r_0 + \beta \cdot T_0}{RT_0}\right) \right\}, \quad (6)$$

r_0 – теплота парообразования при начальной температуре T_0 ;

b – скорость нагрева;

β – величина, показывающая изменение теплоты парообразования при повышении температуры на 1 K;

$E_i(-x)$ – интегральная показательная функция.

Как следует из (6), количество испаренной влаги зависит от скорости нагрева, температуры и эффективности массообменной поверхности. 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

$$Q = c\rho V (\bar{T} - T_0), \quad (7)$$

где c – удельная теплоемкость;

ρ – 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

$$\Delta S_g = \frac{1}{T_0} \left\{ cV\rho \left[bt - \frac{bf^2}{3a} \left(1 - 3 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{l+1}}{\delta_l^4} \sin \delta_l \exp\left(-\delta_l^2 \frac{at}{f^2}\right) \right) \right] - (r_0 - \beta \cdot bt) \frac{A}{b} \exp\left(\frac{\beta}{R}\right) \left\{ \frac{r_0 + \beta \cdot T_0}{R} \left[E_i\left(-\frac{r_0 + \beta \cdot T_0}{R(T_0 + bt)}\right) - E_i\left(-\frac{r_0 + \beta \cdot T_0}{RT_0}\right) \right] + (T_0 + \beta \cdot \tau) \exp\left(-\frac{r_0 + \beta \cdot T_0}{R(T_0 + bt)}\right) - T_0 \exp\left(-\frac{r_0 + \beta \cdot T_0}{RT_0}\right) \right\} \right\}, \quad (8)$$

где $2h$ – толщина изделия,

a – коэффициент температуропроводности,

δ_l – корни характеристического уравнения.

При назначении режимов тепловой обработки конкретных изделий наиболее важным является скорость нагрева b и продолжитель-

ность теплового воздействия T . Связь между ними можно установить из уравнения (8), если наложить дополнительное наиболее естественное с термодинамической точки зрения требования $dS_g = 0$. 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 (8) при $dS_g = 0$ следует, что с увеличением скорости нагрева продолжительность теплового воздействия уменьшается по кривой гиперболического типа, причем, конкретный вид этой зависимости определяется значениями параметров h , cpV , a , A . В частности, увеличение теплоемкости или массивности изделий при заданном b приводит к линейному возрастанию времени на их нагрев.

Методика экспериментальных исследований

Проводимые в работе исследования направлены на внедрение эффективной тепловой обработки бетонов в существующих на заводах камерах, что позволяет улучшить качество бетона, снизить расход топливозаэнергетических ресурсов за счет уменьшения температуры теплоносителя.

Проведение таких исследований направлено на решение следующих задач:

1. Снижение температуры теплоносителя.
2. Снижение материальных затрат.
3. Улучшение качества бетона.

Для проверки теоретических расчетов изучались тепло- и массообменные процессы, кинетика и степень гидратации цемента, физико-механические свойства цементного камня и бетона. Исследования проводились на разработанной и созданной экспериментальной установке (рис. 1), в которую входят:

- 1) камера с двумя параллельно расположенными электроиндукционными нагревателями, которые позволяют создать 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 измерения ее массы;
- 3) теплоизолированная камера для выдерживания образцов после нагрева.



Рисунок 1 – Камера для инфракрасного прогрева

Проводимые в работе исследования направлены на внедрение эффективной тепловой обработки бетонов, что позволит улучшить качество бетона, снизить расход топливозаэнергетических ресурсов. Для исследования температурно-влажностных условий твердения бетона использовались 3 режима:

1. Твердение бетона в нормально-влажностных условиях: при температуре 20 ± 2 °С, влажности 95 % – в камере нормально-влажностного твердения.
2. Тепловая обработка в среде насыщенного пара при температуре 60 °С с тепловым режимом: 2+4+8+2, где предварительная выдержка – 2 ч, подъем температуры – 4 ч, изотермическая выдержка – 8 ч, охлаждение – 2 ч в лабораторной пропарочной камере.
3. Тепловая обработка в среде с инфракрасным прогревом при $t = 60$ °С с тепловым режимом: 2+3+7+2, где предварительная выдержка – 2 ч, подъем температуры – 4 ч, изотермическая выдержка – 8 ч, охлаждение – 2 ч – в теплоизолированной камере с нагревательным инфракрасным элементом пленочного типа, размещенным на внутренних стенках камеры.

Для каждого режима тепловой обработки готовились партии образцов – кубов $100 \times 100 \times 100$ мм и $150 \times 150 \times 150$ мм, образцов призм $100 \times 100 \times 400$ мм из бетонной смеси следующего состава на 1 м^3 :

- портландцемент ПЦ 500 Д0 – 385 кг;
- щебень фракции 5 – 20 мм – 1110 кг;
- песок 1 класса, модуль крупности 2,53 – 735 кг;
- фибра базальтовая – 1 кг;
- добавка пластифицирующая I группы на основе эфиров поликарбоксилатов SikaPlast E-4 – 0,8 % от массы цемента.

Образцы, предназначенные для твердения с инфракрасным прогревом, после формования покрывались пленкообразующим составом – акриловой дисперсией (рис. 2).

Для опытных образцов проводились испытания по определению пористости бетона, предела прочности при сжатии, водопоглощения и водонепроницаемости.



Рисунок 2 – Опытные образцы в изолированной форме с покрытием неизолированной поверхности полиакриловой дисперсией

Исследование температурных полей проводилось на образцах, теплоизолированных по боковой поверхности для обеспечения одномерности теплового потока. Для измерения температуры использовались хромель-капельные термодатчики, установленные на толщине образца. Как показали результаты измерений, по мере прогрева в период подъема температуры перепад температур по сечению незначителен, а через 3 часа температурное поле становится равномерным (см. табл. 1 и рис. 3).

Таблица 1 – Температурное поле

Т-ра, °С	Время тепловой обработки, ч.											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_1	35	50	63	65	65	65	65	65	65	65	55	40
T_2	30	45	58	61	61	60	61	61	61	60	60	52
T_3	26	41	57	60	60	59	59	60	60	60	59	53
T_4	24	43	57	60	60	59	59	60	60	60	59	43

T_1 – температура среды в камере, °С;
 T_2 – температура в верхней части образца, °С;
 T_3 – температура в центре образца, °С;
 T_4 – температура в нижней части образца, °С.

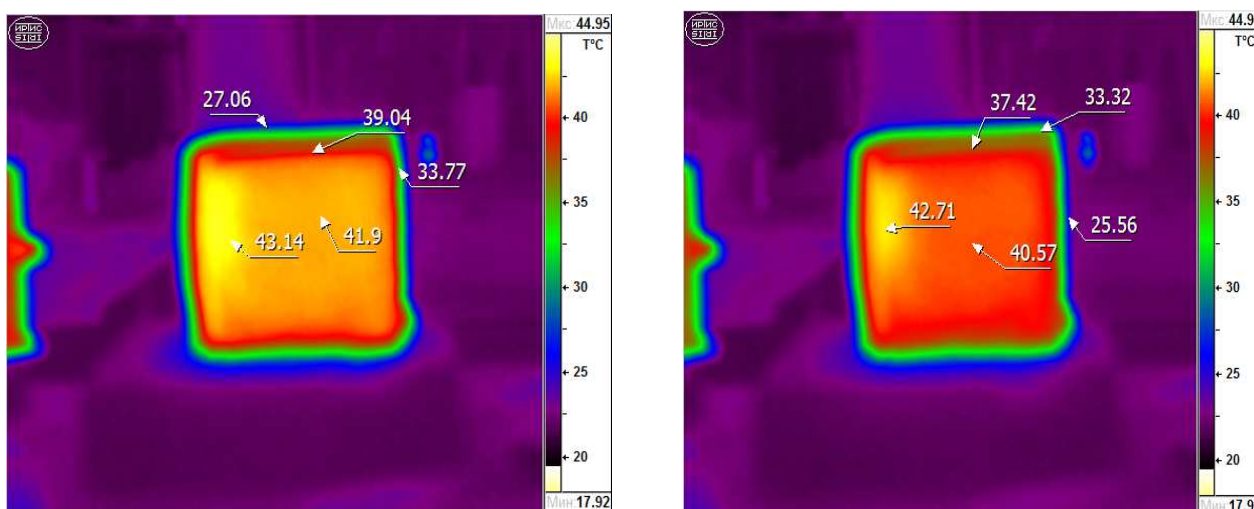
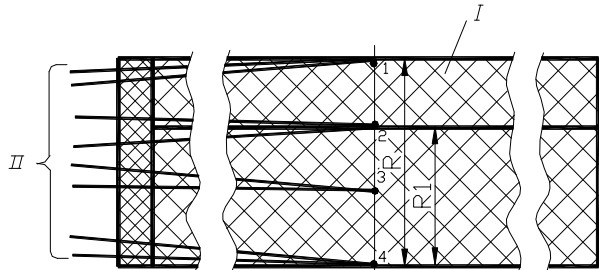


Рисунок 3 – Термограммы температурного поля

Для исследования температурного поля использовали пластину толщиной 10мм и размерами в плане 300×300 мм. Затворенная смесь укладывалась в специально изготовленные формы и уплотнялась в соответствии с требованиями ГОСТ 310. На ранней стадии твердения, когда цементное тесто является релаксационно-поляризованной системой, часть образцов подвергалась воздействию градиентного магнитного поля со следующими параметрами: величина градиента магнитного поля 145 эрстед/см, продолжительность наложения поля 30 мин – начало в 15, окончание в 45 мин с момента затворения цементного теста. По истечении времени предварительной выдержки (2 час) образцы обрабатывались в закрытых формах по следующему режиму: подъем температуры до $T = 80^{\circ}\text{C}$ со скоростью 20 град/час – 3 час; изотермическая обработка при $T = 80^{\circ}\text{C}$ и $\phi = 90\%$ – 10 час; остывание до $T = 40^{\circ}\text{C}$ со скоростью 13 град/час – 3 час.

Образец для определения в нем термодиффузии влаги (см. рис. 3) состоит из двух дисков – верхнего и нижнего, плотно притертых друг к другу. Отношение диаметра образца к его толщине больше 7, поэтому при сушке потоки тепла и влаги можно считать одномерными.

Нижняя и боковая поверхности образца для изучения в нем термодиффузии влаги влагоизолировались. Затем в образец заделываются термодипары в четырех точках – 1, 2, 3, 4 (рис. 4).



I – образец, II – термодипары

Рисунок 4 – Схема опытного образца

В образце по определению коэффициента диффузии влаги влагоизолируется боковая поверхность. Термодипары заделываются в центре образца точно так же, как и в предыдущем случае.

Образец с заделанными в нем термодипарами погружается в дистиллированную воду и находится там до установления в нем максимального влагосодержания. Образец периодически вынимается из воды и взвешивается. Если вес его с течением времени не меняется, то это означает, что влагосодержание его максимальное, и образец вынимается из воды. Влага с поверхности его удаляется путем промокания фильтровальной бумагой. Трехслойный образец сжимается струбиной и готов к сушке.

Для измерения температуры экспериментального образца используются медь-константановые термодипары диаметром 0,2 мм в эмалированной изоляции.

Холодные термодипары находятся при постоянной температуре, равной 0°C (тающий лед). Горячие спаи термодипар помещаются в масляную баню термостата. Температура термостата поддерживается постоянной с точностью до $0,02^{\circ}\text{C}$. Замеряется температура ртутным лабораторным стеклянным термометром с ценой деления $0,01^{\circ}\text{C}$. Замеры термодипар снимаются через каждые 5°C при нагревании от 20 до 100°C и обратно при охлаждении от 100 до 20°C . Результаты представляются в виде кривой $E = f(t)$.

Результаты исследований тепло- и массообменных процессов

Исследования тепло- и массообменных процессов в период нагрева цементного теста позволили установить, что интенсивность испарения g_m зависит не только от температуры поверхности T_n , но и от скорости нагрева b (см. рис. 5). 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 обнажение устьев мелких в поверхностных слоях образцов. В результате сопоставления экспериментальных значений g_m с расчетными (формула (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 b носит экспоненциальный характер, причем имеет место хорошее совпадение с результатами расчета по формуле (6) (рис. 6).

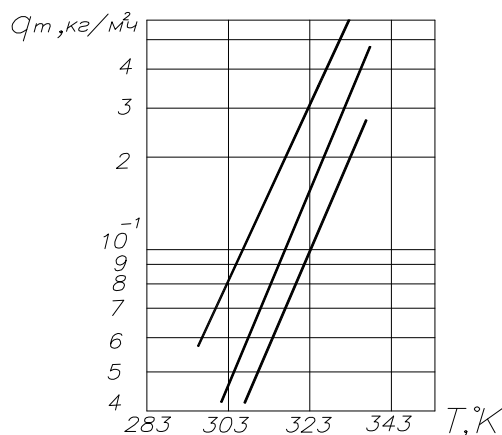


Рисунок 5 – Зависимость интенсивности испарения влаги от температуры поверхности цементного теста при нагреве со скоростью: 1 – 18 град/ч; 2 – 25 град/ч; 3 – 35 град/ч

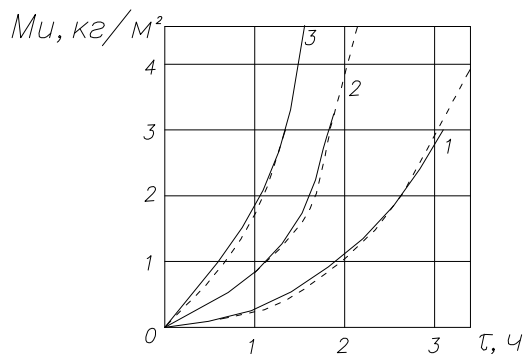


Рисунок 6 – Потери влаги при нагреве цементного теста в сухой среде со скоростью: 1 – 18 град/ч; 2 – 25 град/ч; 3 – 35 град/ч

Для изучения влияния параметров среды в период выдерживания твердеющей системы на характер протекания массообменных процессов 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. 7). Причем четко прослеживается связь между скоростью нагрева b в первый период и g_m во втором, а именно: чем выше b , тем больше потери влаги при выдерживании твердеющей системы в разогретой камере.

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. Снижение интенсивности 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.

В результате исследований установлено, что значительные потери влаги (до 35%) снижают степень гидратации цемента, увеличивают количество открытых капиллярных пор. Прочность цементного камня, подвергнутого нагреву в сухой среде со скоростью 35 град/ч, оказалась меньшей 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 (2,0+3,5).

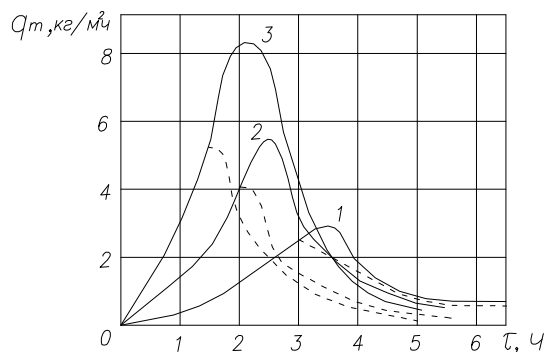
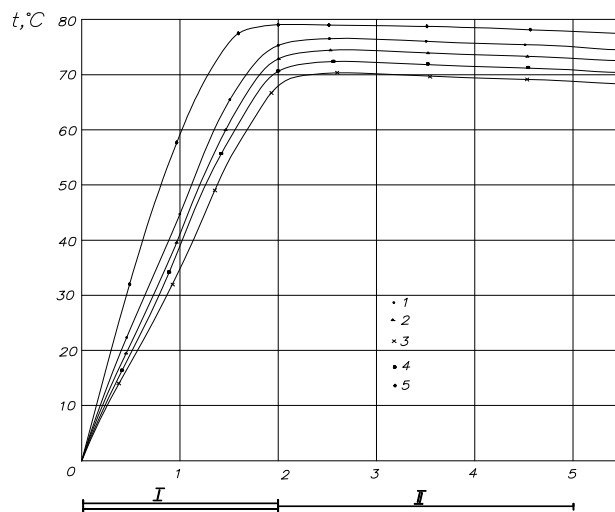


Рисунок 7 – Интенсивность испарения воды затворения из цементного теста при нагреве со скоростью: 1–18 град/ч; 2–25 град/ч; 3–35 град/ч и последующем выдерживании

— в разогретой камере,
- - - - в теплоизолированном объеме

Исследования температурного поля

Результаты исследования температурного поля приведены в таблице 2 и на рис. 8.



1 – температура поверхности бетона; 2 – температура в верхнем среднем сечении образца; 3 – температура в нижнем среднем сечении образца; 4 – температура в нижнем сечении образца; 5 – температура среды в камере

I – период подъема температуры; II – период изотермической выдержки

Рисунок 8 – Кривые кинетики процесса ТО

Определение пористости

Результаты определения пористости образцов представлены на рис. 9.

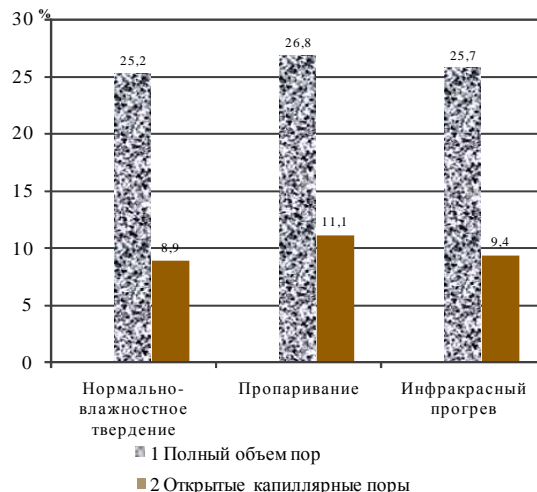
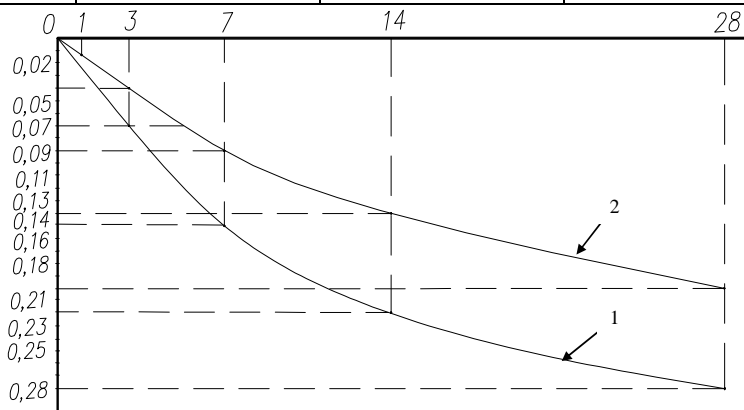


Рисунок 9 – Пористость опытных образцов

Таблица 2 – Температурное поле при режиме 2,0 + 3,5

		Температура, °С				
		В камере, T_1	На поверхности, T_2	В верхнем среднем сечении, T_3	В нижнем среднем сечении, T_4	В нижнем сечении, T_5
Нагрев	0,5	32	22	19	14	16
	1,0	58	44	39	32	35
	1,5	74	66	61	57	54
	2,0	80	76	74	71	67
изотермическая выдержка	2,5	80	77	74	71	73
	3,0	80	77	74	71	73
	3,5	79	76	73	70	72
	4,0	79	76	73	70	72
	4,5	78,5	75,5	72,5	69,5	71,5
	5,0	78,5	75,5	72,5	69,5	71,5
	5,5	78	75	72	69	71



1 – пропаривание бетона по режиму 2+3+6+2; 2 – ИК прогрев по режиму 2,0+3,5

Рисунок 10 – Развитие усадочных деформаций, мм/м, для варьируемых режимов ТО

По результатам исследований видно, что инфракрасный прогрев за счет более равномерного прогрева структуры снижает и общую и открытую капиллярную пористость. Улучшение порового пространства ожидается должно привести и к улучшению деформативных характеристик бетона.

Определение усадки бетона

Зависимость деформаций усадки от времени представлена на рисунке 10.

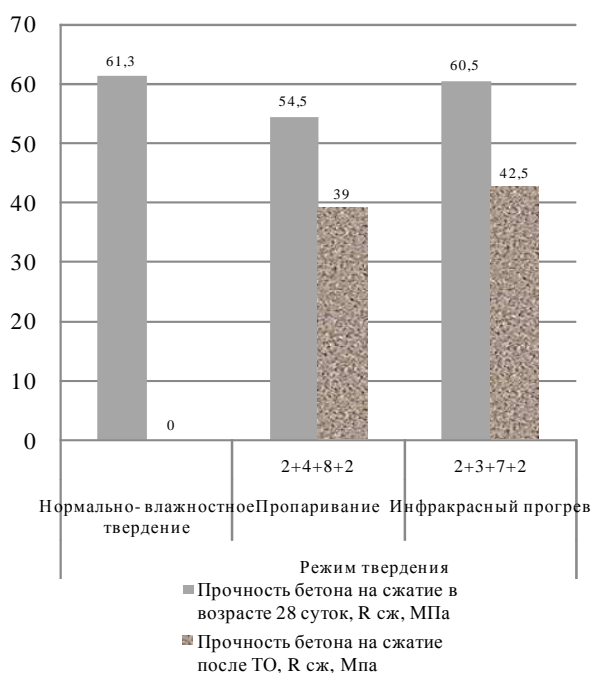


Рисунок 11 – Прочность бетона на сжатие при варьировании режимов ТО

Образцы, подвергнутые ТВО, показывают значительно большие деформации усадки, чем образцы после ИК прогрева, что подтверждает предыдущее предположение и положительном влиянии снижения капиллярной пористости после ИК прогрева на характеристики бетона.

Прочностные показатели

Результаты определения прочности представлены на рисунках 11 и 12 соответственно.

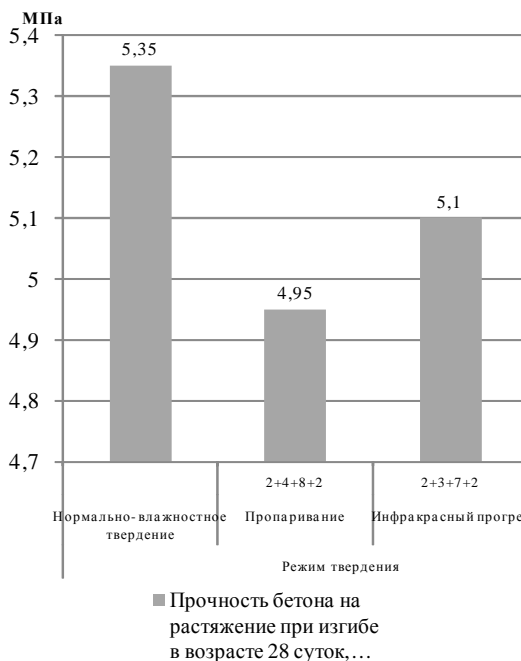


Рисунок 12 – Прочность бетона на растяжение при изгибе при варьировании режимов ТО

Таблица 3 – Структурно-механические свойства цементного камня (В/Ц=к_{н.г.})

№ пп.	Режим:нагрев + выдерживание в теплоизолированном объеме, ч	Скорость нагрева, град/ч	Потери влаги,% от воды затвор.	Кол-во прочно-связан.воды,%		Структурные хар - ки в возрасте 28 суток		Прочность при сжатии через суток, МПа/%		
				сразу после Т.О	через 28 суток	открытые кап. поры,%	Поный объем пор,%	1 7 28		
								1	7	28
1	3,0 + 3,5	18	24	8,9	11,8	11,2	25,7	60	75,2	90,9
								62	77,7	94,2
2	2,0 + 3,5	25	27	8,4	11,4	8,9	25,6	71,5	79,1	93,4
								75	83	98
3	1,5 + 3,5	35	34	6,8	9,9	10,3	25,2	50,3	69	91,3
								51,6	71	94
4	пропаривание по режиму 2 + 3 + 6 + 2	18		9,2	13,7	14,9	26,2	64,7	68,4	83,5
								67,8	71,7	87,6
5	нормальное твердение				10,8	11,7	26,2	17	64,5	96
								18	67,3	100

Изменение плотности и водопоглощения бетонных образцов в зависимости от выбранного режима ТО представлены на рисунках 13 и 14 соответственно.

Также после испытания образцов на водонепроницаемость марка по водонепроницаемости для образцов, подвергнутых ТО, составила W10, в то время как для образцов после ИК прогрева – W14.

Результаты исследования свойств цементного камня приведены в таблице 3.

Заключение

Проведенные в работе как теоретические, так и практические исследования выявили преимущество ИК прогрева бетона.

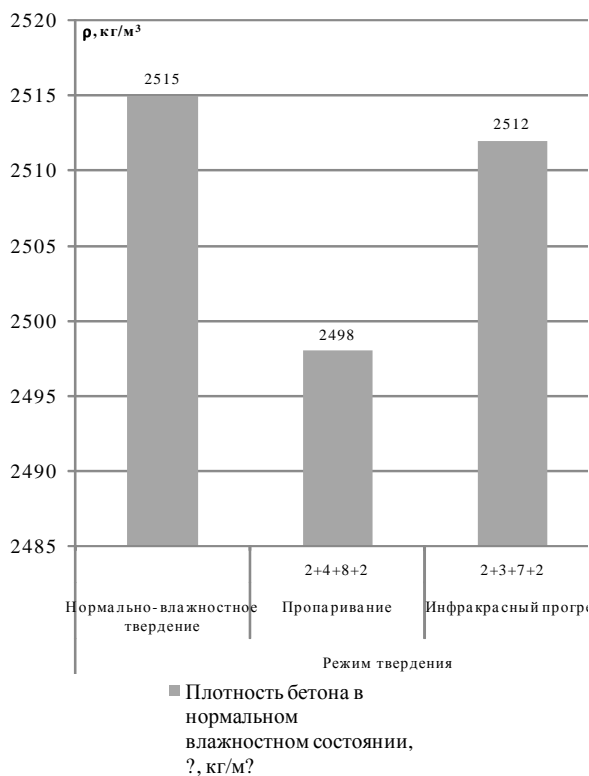


Рисунок 13 – Изменение плотности бетона при варьировании режимов ТО

Так проведенный термодинамический анализ показал возможности улучшения структурных характеристик бетона при тепловой обработке в среде с пониженной влажностью ($\varphi = 5-10\%$ и $T_c > 375\text{ K}$) и уменьшения напряженного состояния при тепло- и массообменных процессах по сравнению с тепловой обработкой в среде влажного насыщенного пара.

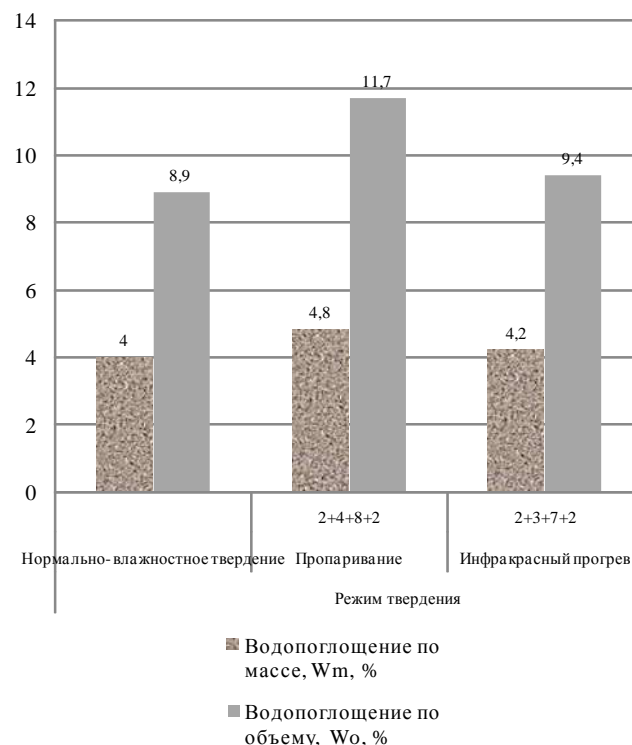


Рисунок 14 – Изменение водопоглощения бетона при варьировании режимов ТО

Это обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, при таком способе тепловой обработки возникают меньшие, чем при пропаривании, и противоположно направленные градиенты температу-

ры 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. Исследования Л. Я. Волосяна, Л. А. Малининой и других показали, что тепловая обработка в среде с пониженной влажностью позволяет получить бетон с физико-механическими свойствами, приближающимися к свойствам бетона нормального твердения.

Теоретические предположения были подтверждены результатами проведенных экспериментальных значений. В результате предложен режим тепловой обработки: нагрев – 2,0 ч. и выдерживание в теплоизолированном объеме с $T_c < T_n$ в течение 3,5 ч; скорость нагрева бетонной смеси $b=25$ град/ч. При предложенном режиме ИК прогрева прочность в первые сутки составила 50–55% $R_{28}^{H.T.B.}$, а в 28-суточном возрасте – 95–98% $R_{28}^{H.T.B.}$.

Снижение интенсивности внешнего массообмена в период упрочнения кристаллизационной структуры позволяет получить искусственный камень с требуемыми физико-механическими свойствами. Показана возможность применения данного способа тепловой обработки для изделий с большим модулем открытой поверхности и низким начальным влажностью.

Экспериментально доказано, что частичное испарение воды затворения из твердеющей системы в период нагрева способствует формированию более плотной структуры цементного камня, характеризующейся меньшим количеством открытых капиллярных пор и полным объемом пор в сравнении с пропаренными образцами.

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.

Физико-механические свойства цементного камня и бетона, прошедших тепловую обработку по предлагаемому режиму, приближаются к свойствам искусственного камня нормального твердения.

Список цитированных источников

1. Журавлева, В. П. Массотеплоперенос при термообработке и сушке капиллярнопористых строительных материалов. – Минск : Издательство «Наука и техника», 1972. – 189 с.
2. Малинина, Л. А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. – М. : Стройиздат, 1977. – 158 с.
3. Орлович, А. И. Исследование влияния условий твердения на основные физико-механические свойства цементного камня и бетона. – Минск, 1979.
4. Горчаков, Г. И. Вяжущие вещества, бетоны и изделия из них / Г. И. Горчаков [и др.] – М. : Высшая школа, 1976 – 293 с.
5. Баженов, Ю. М. Технология бетона. – М. : Высшая школа, 1987. – 304 с.
6. Гершберг, О. А. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М. : Издательство литературы по строительству, 1971. – 353 с.
7. Горчаков, Г. И. Бетонovedение – проблема ресурсосбережения и качества бетона // Бетон и железобетон. – 1990. – № 7. – С. 37–38.

8. Симонов, М. З. Развитие применения бетона и проблема сырья // Бетон и железобетон. – 1986. – № 9. – С. 17–18.
9. Технология бетонных и железобетонных изделий / Под общей ред. В. Н. Сизова – Москва : Высшая школа, 1972. – 516 с.
10. Шихненко, И. В. Краткий справочник инженера-технолога по производству железобетона. – Киев : Будивэльник, 1989. – 294 с.
11. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести : ГОСТ 24544-81*. – Минск : Из-во стандартов, 1981 – 55 с.
12. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия : ГОСТ 10178-85. – Минск : Из-во стандартов, 1985. – 43 с.
13. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам : ГОСТ 10180-90. – Минск : Из-во стандартов, 1990. – 48 с.
14. Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости : ГОСТ 12730.0-78. – Минск : Из-во стандартов, 1978. – 27 с.
15. Бетонные и железобетонные конструкции : БНБ 5.03.01 – 02. – Минск : Из-во стандартов, 2002. – 139 с.

References

1. Zhuravleva, V. P. Massoteploperenos pri termoobrabotke i sushke kapillyarnoporistyh stroitel'nyh materialov. – Minsk : Izdatel'stvo «Nauka i tekhnika», 1972. – 189 s.
2. Malinina, L. A. Teplovlazhnostnaya obrabotka tyazhelogo betona. – M. : Strojizdat, 1977. – 158 s.
3. Orlovich, A. I. Issledovanie vliyaniya uslovij tverdeniya na osnovnye fiziko-mekhanicheskie svoystva cementnogo kamnya i betona. – Minsk, 1979.
4. Gorchakov, G. I. Vyazhushchie veshchestva, betony i izdeliya iz nih / G. I. Gorchakov [i dr.]. – M. : Vysshaya shkola, 1976 – 293 s.
5. Bazhenov, Yu. M. Tekhnologiya betona. – M. : Vysshaya shkola, 1987. – 304 s.
6. Gershberg, O. A. Tekhnologiya betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij. – Moskva : Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1971. – 353 s.
7. Gorchakov, G. I. Betonovedenie – problema resursosberezheniya i kachestva betona // Beton i zhelezobeton. – 1990. – № 7. – С. 37–38.
8. Simonov, M. Z. Razvitie primeneniya betona i problema syr'ya // Beton i zhelezobeton. – 1986. – № 9. – С. 17–18.
9. Tekhnologiya betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij / Pod obshchej red. V. N. Sizova. – Moskva : Vysshaya shkola, 1972. – 516 s.
10. Shihnenko, I. V. Kratkij spravochnik inzhenera-tekhnologa po proizvodstvu zhelezobetona. – Kiev : Budiv'el'nik, 1989. – 294 s.
11. Betony. Metody opredeleniya deformatsij usadki i polzuchesti : GOST 24544-81*. – Minsk : Iz-vo standartov, 1981. – 55 s.
12. Portlandcement i shlakopordlandcement. Tekhnicheskie usloviya : GOST 10178-85. – Minsk : Iz-vo standartov, 1985. – 43 s.
13. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obrazcam : GOST 10180-90. – Minsk : Iz-vo standartov, 1990. – 48 s.
14. Betony. Obshchie trebovaniya k metodam opredeleniya plotnosti, vlazhnosti, vodopoglashcheniya, poristosti i vodonepronaemosti : GOST 12730.0-78. – Minsk : Iz-vo standartov, 1978. – 27 s.
15. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : BNB 5.03.01 – 02. – Minsk : Iz-vo standartov, 2002. – 139 s.

Материал поступил в редакцию 03.01.2020