

## Назначение и обоснование традиционных режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий

Магистр техн. наук Ж. Л. Зеленковская<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. С. Н. Ковшар<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023  
Belarusian National Technical University, 2023

**Реферат.** В статье рассмотрены сравнительные характеристики наиболее распространенных режимов тепловлажностной обработки (ТВО), их достоинства и недостатки, а также предложения по оптимизации этапов ТВО для получения максимального эффекта ускорения твердения бетона за счет использования тепловой энергии. Тепловлажностная обработка бетона – один из самых сложных этапов в технологии сборного и монолитного бетона. Основой долговечности конструкций, их бесперебойной службы в течение проектного срока эксплуатации является правильно подобранный режим ТВО, который обеспечивает повышение качества изделий и снижает материальные затраты в виде сокращения энергозатрат. Поэтому неприемлемы до сих пор практикуемые упрощенные методики подбора режима ТВО. Только при условии строгого и научно обоснованного учета комплекса факторов, оказывающих влияние на протекающие процессы формирования структуры цементного камня и бетона и взаимодействия между ними, возможно получение бетона с требуемыми характеристиками. В зависимости от требований, предъявляемых к готовому материалу на основе знания механизма тепломассопереноса, могут быть рассчитаны рациональные методы и режимы термообработки бетонных и железобетонных изделий. Разнообразие режимов ТВО обусловлено стремлением уменьшить возможность образования дефектов в структуре бетона (например, режимы со ступенчатым либо криволинейным набором температуры, что снижает градиент температур по сечению изделия), сократить энергозатраты (режимы с исключением стадии изотермической выдержки) и др. В процессе ТВО бетонных и железобетонных изделий происходит ряд химических и физических преобразований бетонной смеси (бетона), в результате которых возможно появление различных дефектов в структуре материала, ухудшающих его свойства (прочность, проницаемость, усадку, ползучесть и в целом долговечность бетона). Современная технология производства бетонных и железобетонных изделий и конструкций предусматривает введение разнообразных химических добавок, влияние которых на твердение бетона при повышенных температурах, к сожалению, недостаточно отражено в специальной литературе. Например, длительность общего цикла ТВО бетона при использовании химических добавок – ускорителей твердения может быть сокращена за счет уменьшения периодов предварительной выдержки, подъема температуры и продолжительности изотермической выдержки; а применение пластификаторов в зависимости от их вида и содержания может привести к удлинению цикла. Необходимо иметь аналитические зависимости для расчетов режимов ТВО и компьютерную модель процесса твердения бетона при повышенных температурах.

**Ключевые слова:** тепловлажностная обработка, предварительная выдержка, подъем температуры, изотермическая выдержка, охлаждение, структурообразование бетона, ускорители твердения, пластификаторы, воздухововлекающие добавки, прочность бетона

**Для цитирования:** Зеленковская, Ж. Л. Назначение и обоснование традиционных режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / Ж. Л. Зеленковская, С. Н. Ковшар // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 2. С. 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-150-157>

## Purpose and Justification of Traditional Modes of Heat Treatment of Concrete and Reinforced Concrete Products

Zh. L. Zelenkovskaya, S. N. Kovshar

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper presents the comparative characteristics of the most common modes of heat and moisture treatment (HMT), their advantages and disadvantages, as well as proposals for optimizing the HMT stages to obtain

**Адрес для переписки**  
Зеленковская Жанна Леонидовна  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 12,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-96-73  
ZhannaZelenaya@yandex.by

**Address for correspondence**  
Zelenkovskaya Zhanna L.  
Belarusian National Technical University  
12, Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-96-73  
ZhannaZelenaya@yandex.by

the maximum effect of accelerating concrete hardening through the use of thermal energy. Heat and moisture treatment of concrete is one of the most difficult stages in the technology of prefabricated and monolithic concrete. The basis for the durability of structures, their uninterrupted service during the design period of operation is a properly selected HMT mode, which improves the quality of products and reduces material costs in the form of a reduction in energy costs. Therefore, the still practiced simplified methods for selecting the HMT mode are unacceptable. Only under the condition of strict and scientifically substantiated consideration of a complex of factors influencing the ongoing processes of formation of the structure of cement stone and concrete, and the interaction between them, it is possible to obtain concrete with the required characteristics. Depending on the requirements for the finished material, based on knowledge of the mechanism of heat and mass transfer, rational methods and modes of heat treatment of concrete and reinforced concrete products can be calculated. A variety of HMT modes is due to the desire to reduce the possibility of defects in the concrete structure (for example, modes with a stepped or curvilinear temperature increase, which reduces the temperature gradient across the product section), to reduce energy costs (modes with the exclusion of the isothermal holding stage), etc. In the process of HMT of concrete and reinforced concrete products, a number of chemical and physical transformations of the concrete mixture (concrete) occur, as a result of which various defects in the structure of the material may appear, which worsen its properties (strength, permeability, shrinkage, creep and, in general, durability of concrete). Modern technology for the production of concrete and reinforced concrete products and structures provides for the introduction of various chemical additives, their effect on the hardening of concrete at elevated temperatures, unfortunately, is not sufficiently reflected in the specialized literature. For example, the duration of the total cycle of concrete HMT when using chemical additives – hardening accelerators can be reduced by reducing the periods of preliminary exposure, temperature rise and the duration of isothermal exposure; and the use of plasticizers, depending on their type and content, can lead to a lengthening of the cycle. It is necessary to have analytical dependencies for calculating HMT modes and a computer model of the concrete hardening process at elevated temperatures.

**Keywords:** heat and moisture treatment, preliminary exposure, temperature rise, isothermal exposure, cooling, concrete structure formation, hardening accelerators, plasticizers, air-entraining additives, concrete strength

**For citation:** Zelenkovskaya Zh. L., Kovshar S. N. (2023) Purpose and Justification of Traditional Modes of Heat Treatment of Concrete and Reinforced Concrete Products. *Science and Technique*. 22 (2), 150–157. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-150-157> (in Russian)

## Введение

Тепловлажностная обработка (ТВО) сборных железобетонных изделий и конструкций на предприятиях стройиндустрии все еще остается одним из наиболее распространенных способов ускорения твердения бетона. В последние годы в связи с применением эффективных химических добавок – ускорителей твердения и комплексов на их основе эффективность ТВО значительно возросла [1, 2].

Обычно по имеющимся таблицам, собственным данным назначаются режимы тепловлажностной обработки бетона с их последующей экспериментальной проверкой. При этом в качестве основного критерия принимается получение заданной прочности бетона, а успех при решении данной задачи предопределяется как правильным подбором состава бетона, так и технически обоснованным установлением основных параметров тепловлажностной обработки [3–5]. Различные режимы тепловлажностной обработки бетона приведены на рис. 1.

Разнообразие режимов ТВО обусловлено стремлением уменьшить возможность образо-

вания дефектов в структуре бетона (например, режимы со ступенчатым либо криволинейным набором температуры, что уменьшает градиент температур по сечению изделия), сократить энергозатраты (например, режимы с исключением стадии изотермической выдержки) и др. [6, 7]. В процессе ТВО бетонных и железобетонных изделий происходит ряд химических и физических преобразований бетонной смеси (бетона), в результате которых возможно появление различных дефектов в структуре материала, ухудшающих свойства (прочность, проницаемость, усадку, ползучесть и в целом долговечность бетона) [8–10].

Классический трапецидальный режим ТВО принято рассматривать как отдельные этапы, характеризующиеся своими особенностями – длительностью  $\tau$ , температурой  $t$ , скоростью изменения  $v$  (предварительная выдержка  $\tau_{пв}$ ,  $t_{пв}$ , подъем температуры  $\tau_{пт}$ ,  $v_{пт}$ , изотермическая выдержка  $\tau_{ив}$ ,  $t_{ив}$ , охлаждения  $\tau_о$ ,  $v_о$ ). Однако есть общие процессы, определяющие последующую дефектность структуры изделий.

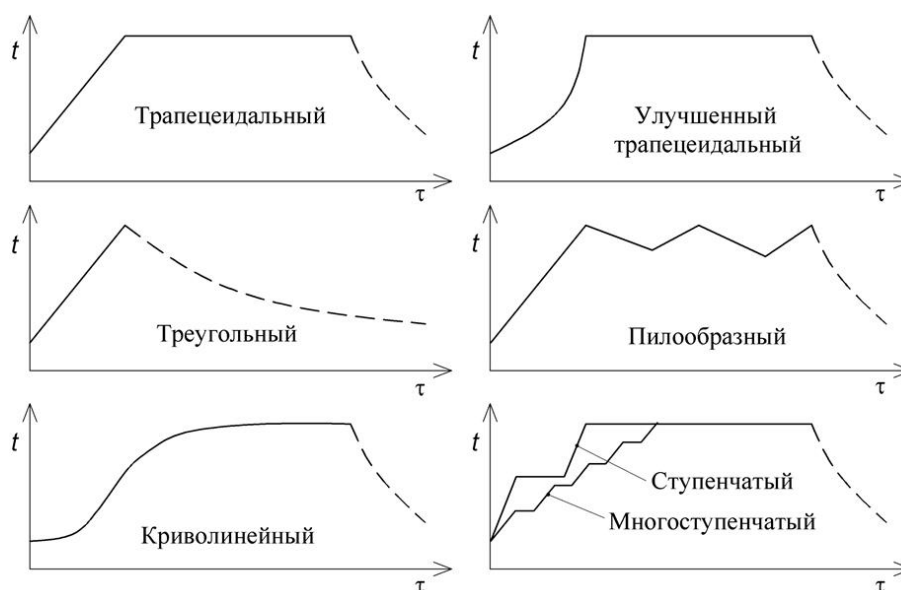


Рис. 1. Варианты тепловлажностной обработки бетона  
Fig. 1. Options for heat and moisture treatment of concrete

Анализ влияния различных факторов на структурообразование бетонов показывает, что деструктивные процессы в твердеющем бетоне могут быть сведены к минимуму вследствие применения комплекса мероприятий [11]. Прежде всего, в зависимости от требований, предъявляемых к готовому материалу (прочность, трещино- и морозостойкость, проницаемость) на основе знания механизма тепло-массообмена, должны быть выбраны рациональные метод и режим термообработки [12, 13]. Учет кинетики теплообмена, а также отрицательных воздействий на структурообразование бетона позволяет влиять на процесс ТВО и, как следствие, получение качественной готовой продукции [14].

#### Анализ периодов тепловлажностной обработки изделий

Современный режим тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий (пропаривание) состоит из следующих периодов:

- 1) предварительное выдерживание до пропаривания;
- 2) повышение температуры в камере пропаривания;
- 3) непосредственно изотермическое прогревание;
- 4) охлаждение.

Рассмотрим подробнее каждый из периодов тепловой обработки изделий.

*Предварительная выдержка.* Для того чтобы в процессе теплового воздействия не наблюдалось нарушения структуры бетона, последний должен обладать определенной начальной прочностью, которая приобретает им на стадии предварительного выдерживания. На прочность готового изделия отрицательно действует преждевременное повышение температуры даже в условиях, исключающих возможность испарения влаги. Оптимальное время предварительной выдержки бетона перед тепловой обработкой, по мнению А. Е. Шейкина, зависит от ряда факторов, и оно тем меньше, чем тоньше помол цемента, чем меньше в нем белита и чем выше температура среды, в которой находится бетон перед ТВО.

С. А. Миронов [15, 16] считал, что предварительная выдержка не только повышает прочность бетона, но и обеспечивает получение более устойчивых прочностных показателей. Максимального эффекта можно достичь предварительной выдержкой перед пропариванием подвижных бетонных смесей. Она также целесообразна и перед пропариванием жестких смесей, что способствует более интенсивному росту прочности при последующем твердении.

В исследованиях Л. А. Малининой и С. А. Миронова [17] оптимальным временем предварительного выдерживания считается начало схватывания бетона, а, по данным [18], оптимальным временем этого технологического передела следует считать период, за который бетон приобретает прочность порядка 0,3–0,5 МПа.

Таким образом, в период предварительного выдерживания складывается определенная структура бетона, которая формируется в сравнительно спокойных условиях (при отсутствии интенсивной миграции влаги, температурных деформаций составляющих бетон материалов и т. д.). Эта структура становится способной воспринимать тепловое воздействие при подъеме температуры без ее существенного изменения.

Авторами посредством обработки экспериментальных данных, а также анализа информации, почерпнутой из различных источников, получены аналитические зависимости для расчета периодов ТВО бетона. Так, для расчета длительности предварительной выдержки бетона, как функции не только плотности начальной структуры цементного камня, характеризующей водоцементным отношением, группы активности цемента при пропаривании, но также вида и содержания химических добавок получено выражение

$$\begin{aligned} \tau_{пв} = & 0,6 \exp(0,5Grc) + \\ & + \frac{[3,0 \exp(0,3Grc)](1 + b_{пввв} V_{возд}^{m_{пввв}})}{(1 + D_{ус})} \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{\times (1 + b_{пвпл} D_{пл}^{m_{пвпл}}) \left(\frac{B}{\Omega} - 0,2\right)^{n_{пв}}}{(1 + D_{ус})} \quad (1) \end{aligned}$$

где  $Grc$  – группа цемента по эффективности при пропаривании;  $b_{пввв}$ ,  $m_{пввв}$  – коэффициенты, зависящие от вида воздухововлекающей добавки (могут быть приняты равными соответственно 0,5 и 1,5);  $b_{пвпл}$ ,  $m_{пвпл}$  – то же от вида пластифицирующей добавки (могут быть приняты равными соответственно 0,7 и 1,3);  $V_{вв}$  – объем вовлеченного в бетонную смесь воздуха при введении воздухововлекающей добавки, % по объему;  $D_{пл}$ ,  $D_{ус}$  – дозировка пластифициру-

ющей добавки и ускорителя твердения, % от массы цемента по сухому веществу;  $n_{пл}$  – показатель степени (может быть принят равным 2,0).

*Подъем температуры.* Исследованиями И. Н. Ахвердова, С. А. Миронова, Л. А. Малининой и других показано, что наиболее существенное влияние на формирование структуры бетона оказывают условия его твердения в начальный период. Именно для этой стадии ТВО – стадии подъема температуры (или нагрева бетона) характерно возникновение перепадов температуры, изменения влагосодержания и избыточного давления. Поскольку в течение этого периода в бетоне происходят основные фазовые превращения, ведущие к формированию структуры бетона, от характера их протекания и возможности интенсификации этого процесса зависят физико-механические характеристики бетона. И именно по этой причине на данной стадии твердения бетона большое значение имеет правильное установление скорости подъема температуры и разогрева бетона.

Из сказанного выше следует, что на стадии повышения температуры создаются благоприятные условия для химических реакций, так как при повышенной температуре в бетоне полностью сохраняется количество воды затворения. Однако этот этап неблагоприятен для формирования физической структуры вследствие явлений, приводящих к образованию в ней различного рода дефектов. От правильного выбора длительности периода подъема температуры зависит эффективность последующего твердения бетона.

Нами получены зависимости, позволяющие ориентировочно рассчитывать время (либо скорость) подъема температуры твердеющего бетона.

Скорость подъема температуры без добавок, °C/ч:

$$V_{птбд} = a_{птбд} - b_{птбд} \left(\frac{B}{\Omega}\right)^{n_{птбд}}, \quad (2)$$

где  $a_{птбд}$ ,  $b_{птбд}$ ,  $n_{птбд}$  – коэффициенты, зависящие от интенсивности твердения бетона на ранней стадии (могут быть приняты равными соответственно 26, 15 и 3).

Введение в бетонную смесь добавки ускорителя твердения способствует интенсификации процессов твердения и, следовательно, увеличению коэффициента нарастания прочности бетона  $k_{птус}$

$$k_{птус} = a_{птус} + b_{птус} D_{ус}, \quad (3)$$

где  $a_{птус}$ ,  $b_{птус}$  – коэффициенты, зависящие от эффективности добавки ускорителя твердения (могут быть приняты равными соответственно 0,9838 и 0,1358).

Применение воздухововлекающих добавок вызывает увеличение длительности стадии подъема, и коэффициент нарастания прочности бетона  $k_{птвв}$  может быть рассчитан с учетом интегрированного параметра – объема вовлеченного воздуха:

$$k_{птвв} = a_{птвв} - b_{птвв} V_{возд}, \quad (4)$$

где  $b_{птвв}$  – коэффициент, зависящий от вида воздухововлекающей добавки (может быть принят равным 0,1);  $V_{возд}$  – объем вовлеченного в бетонную смесь воздуха при введении воздухововлекающей добавки, % по объему.

И тогда окончательно скорость подъема температуры рассчитываем по формуле

$$V_{пт} = V_{птбд} k_{птус} k_{птвв}. \quad (5)$$

*Изотермическая выдержка.* После повышения в камере температуры до заданного максимума изделие подвергают ТВО при определенной постоянной температуре (изотермический прогрев). Исследования изменения влажностного состояния и температуры изделия при ТВО проводились Н. Б. Марьямовым. На их основе он сделал вывод, что в течение небольшого промежутка времени вследствие теплового эффекта реакции гидратации цемента температура бетона значительно возрастает и может превысить температуру среды на 6–8 °С.

Продолжительность периода изотермического прогрева должна назначаться в зависимости от требуемой прочности бетона (распалубочной, передаточной, отпускной), а также иных влияющих факторов (примеры на рис. 2, 3).

Нами получены зависимости, позволяющие рассчитывать кинетику изменения относительной (в % от проектной) прочности бетона.

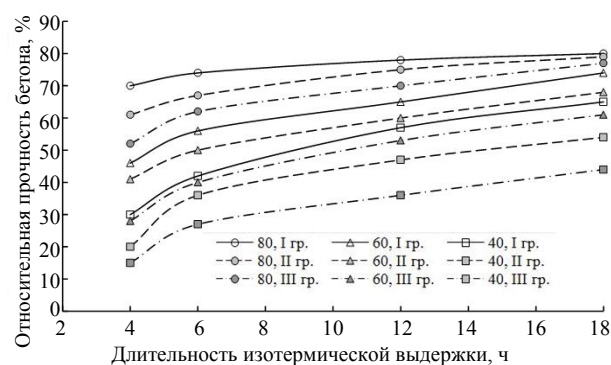


Рис. 2. Влияние длительности и температуры изотермической выдержки бетона, группы эффективности цемента при пропаривании на относительную прочность бетона прочностью в проектном возрасте 40 МПа

Fig. 2. Influence of duration and temperature of isothermal exposure of concrete, cement efficiency group during steaming on relative strength of concrete with strength at design age of 40 MPa

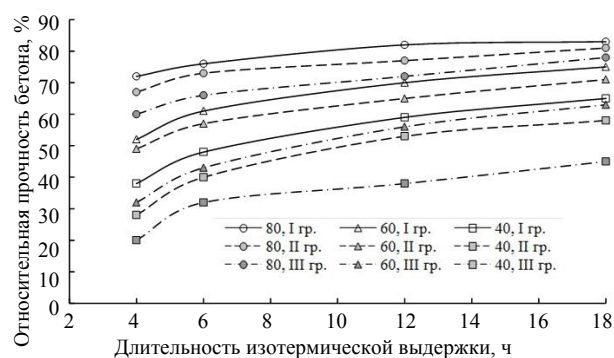


Рис. 3. Влияние длительности и температуры изотермической выдержки бетона, группы эффективности цемента при пропаривании на относительную прочность бетона прочностью в проектном возрасте 50 МПа

Fig. 3. Influence of duration and temperature of isothermal exposure of concrete, cement efficiency group during steaming on relative strength of concrete with strength at design age of 50 MPa

Вначале по любому наработанному методу проектирования состава рассчитываем абсолютную (требуемая) прочность бетона (МПа), которую необходимо получить после его тепловой обработки, а затем – прочность, получаемую в зависимости от изменения температуры и длительности тепловлажностной обработки, толщины изделия, группы цемента по эффективности при пропаривании, вида и дозировки ускорителя твердения, пластифицирующей добавки, содержания воздуха в бетонной смеси. При совпадении расчетной и требуемой прочности варьирование влияющих факторов пре-

кращается, это и есть оптимальный режим тепловлажностной обработки бетона.

В зависимости от прочности бетона  $f_6$  (МПа) и продолжительности изотермической выдержки  $\tau_{из}$  определим относительную прочность бетона через 4 и 18 ч изотермической выдержки:

$$f_{отн4} = a_{04} + a_{14}f_6 + a_{24}f_6^2 + b_{14}\tau_{из} + b_{24}\tau_{из}^2 + ab_4f_6\tau_{из}; \quad (6)$$

$$f_{отн18} = a_{018} + a_{118}f_6 + a_{218}f_6^2 + b_{118}\tau_{из} + b_{218}\tau_{из}^2 + ab_{18}f_6\tau_{из}. \quad (7)$$

Коэффициенты для расчета соответствующих полиномов берем из табл. 1.

Таблица 1

Коэффициент полинома	Группа цемента по эффективности при пропаривании		
	I	II	III
$a_{018}$	-2,967	-14,387	-22,988
$a_{04}$	-25,306	-51,149	0,9053
$a_{118}$	0,95	0,943	0,80504
$a_{14}$	1,1098	0,9678	0,6125
$a_{218}$	-0,0053	-0,00537	-0,00502
$a_{24}$	-0,00599	-0,00576	-0,00366
$b_{118}$	1,081	1,1775	1,1783
$b_{14}$	0,3775	1,154	-0,713
$b_{218}$	-0,00354	-0,00354	-0,00271
$b_{24}$	0,00625	-0,000833	0,01431
$ab_{18}$	-0,00275	-0,00225	-0,0008125
$ab_4$	-0,00319	-0,0009375	0,0000801

С учетом температуры изотермической выдержки  $t_{из}$  рассчитаем относительную прочность (%) после тепловой обработки

$$f_{отн} = f_{отн4} \left( \frac{f_{отн18} - f_{отн4}}{\lg 18 - \lg 4} \right) (\lg(t_{из}) - \lg 4). \quad (8)$$

В зависимости от относительной прочности бетона определим коэффициент его нарастания – по мере роста прочности интенсивность процессов падает:

$$k_{нар} = 1,711 f_{отн}^{-0,117}. \quad (9)$$

Неравномерность прогрева центра изделия, подвергаемого ТВО, и поверхностных слоев,

интегрально оцениваемая толщиной изделия, также влияет на темп твердения. Коэффициент нарастания относительной прочности бетона в зависимости от толщины изделия  $h_{тб}$ , влияющих коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$ , учитывающих минеральный состав цемента (для цемента завода «Кричевцементношифер» марки 500 могут быть приняты равными 200 и 5 соответственно), а также продолжительности изотермической выдержки  $\tau_{из}$  (рис. 4) рассчитывается по формуле

$$k_{тб} = 1 + \frac{k_1}{h_{тб}(\tau_{из} + k_2)}. \quad (10)$$

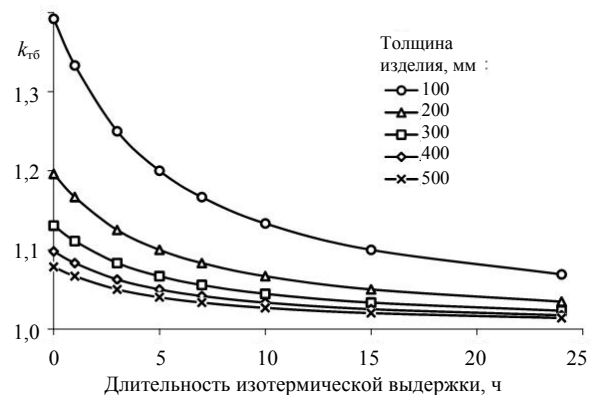


Рис. 4. Изменение коэффициента нарастания прочности бетона  $k_{тб}$  в зависимости от длительности изотермической выдержки

Fig. 4. Change of concrete strength increase factor  $k_{tb}$  depending on isothermal exposure duration

Эффективность действия добавки ускорителя твердения бетона, характеризуемая коэффициентом  $k_{ус}$ , также снижается с увеличением продолжительности изотермической выдержки (рис. 5).

Коэффициент нарастания относительной прочности бетона в зависимости от дозировки  $D_{ус}$  и коэффициента эффективности добавки ускорителя твердения ( $k_{эфус}$  – для добавки хлористого кальция как эталона, может быть принят равным 1,0), продолжительности изотермической выдержки  $\tau_{из}$  и влияющего коэффициента  $k_4$ , учитывающего минеральный состав цемента (для цемента завода «Кричевцементношифер» марки 500 может быть принят равным 0,5), вычислим по формуле

$$k_{ус} = 1 + \frac{D_{ус} k_{эфус}}{\tau_{из} + k_4}. \quad (11)$$

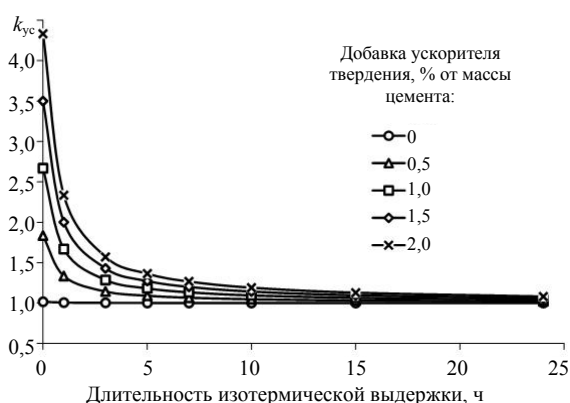


Рис. 5. Изменение коэффициента нарастания прочности бетона  $k_{yc}$  в зависимости от дозировки добавки ускорителя твердения

Fig. 5. Change in strength factor of concrete  $k_{yc}$  depending on dosage of hardening accelerator additive

Абсолютная прочность бетона (МПа) после тепловой обработки

$$f_{\text{бто}} = f_{\text{б}} k_{\text{нар}} k_{\text{тб}} k_{\text{ус}}. \quad (12)$$

Как отмечалось выше, можно сделать вывод об оптимальности спроектированного режима тепловлажностной обработки бетона.

**Охлаждение.** На этом этапе в тепловой камере температура бетона должна снизиться до температуры окружающей среды, и на этой стадии ТВО может происходить образование дефектов в структуре бетона, поскольку внутреннее давление паров в изделии превышает давление паров окружающей среды. За счет образовавшегося температурного градиента происходит интенсивное испарение влаги из бетона. По мере охлаждения изделия и испарения влаги с поверхности происходит миграция влаги из центральных участков. Влага, удаляясь в виде пара, образует каналы, которые идут от внутренних участков изделия к наружной поверхности, соединяя между собой пустоты и поры, образовавшиеся в процессе приготовления и укладки бетона. Вследствие этого образующаяся направленная пористость приводит к повышению водопроницаемости, падению морозостойкости бетона и в целом снижению долговечности бетонных и железобетонных изделий и конструкций.

Допустимая скорость понижения температуры зависит от прочности бетона, полученной к окончанию изотермического прогрева изде-

лия. Температурный градиент приводит к образованию растягивающих напряжений. Поэтому чем выше прочность бетона, тем большие напряжения он может воспринять без разрушения. При повышенных требованиях к водонепроницаемости и морозостойкости целесообразно охлаждать изделия путем орошения их водой с постепенным снижением ее температуры до температуры окружающей среды.

## ВЫВОДЫ

1. Для получения максимального эффекта интенсификации твердения бетона за счет использования тепловой энергии при назначении режимов его тепловлажностной бетона необходимо учитывать взаимодействие между собой факторов, оказывающих влияние на протекающие процессы формирования структуры цементного камня и бетона. Лишь при условии их строгого и научно обоснованного учета возможно получение бетона с требуемыми характеристиками и обеспечение экономии тепловой энергии на его тепловлажностную обработку.

2. Полученные аналитические зависимости открывают возможность компьютерного моделирования процесса тепловлажностной обработки бетона и его оптимизации с учетом всего комплекса влияющих технологических факторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, В. В. Новая технология тепловлажностной обработки конструкций / В. В. Михайлов, А. К. Карачковский, В. С. Волков // Бетон и железобетон. 1988. № 12. С. 4–10.
2. Синякин, А. Г. Совершенствование режимов твердения бетонов с учетом неизотермического тепловыделения цемента: автореф. ... канд. техн. наук / А. Г. Синякин. Харьков, 1995. 18 с.
3. Дворкин, Л. И. Проектирование состава бетона при термосном выдерживании конструкции / Л. И. Дворкин, Ю. В. Гарницкий // Бетон и железобетон. 2000. № 6. С. 6–8.
4. Мчедлов-Петросян, О. П. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов / О. П. Мчедлов-Петросян, А. В. Ущеров-Маршак, А. М. Урженко. М.: Стройиздат, 1984. 224 с.
5. Шифрин, С. А. Кинетика тепловыделения цемента и выбор эффективных режимов теплового воздействия на монолитный бетон / С. А. Шифрин. М., 1979. 20 с.
6. Лысов, В. П. Формирование ресурсосберегающих технологических процессов возведения конструкций из монолитного бетона / В. П. Лысов. М., 1984. 38 с.

7. Бобко, Ф. А. Обоснование режимов возведения бетонных и железобетонных конструкций на основе оптимизации энергетического потенциала технологических процессов. Результаты исследований, основы моделирования и прогнозирования / Ф. А. Бобко. Минск, 1998. 39 с.
  8. Ахвердов, И. Н. Высокопрочный бетон / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1961. 163 с.
  9. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
  10. Ахвердов, И. Н. Теоретические основы бетоноведения / И. Н. Ахвердов. Минск: Вышэйшая школа, 1991. 188 с.
  11. Шеин, В. И. Некоторые особенности структурообразования бетонов при повышенных температурах / В. И. Шеин // Управляемое структурообразование в производстве строительных материалов. Киев: Будивельник, 1968. С. 34–40.
  12. Ушеров-Маршак, А. В. «Термобетон-М» – информационная технология монолитного бетона / А. В. Ушеров-Маршак, Ю. Б. Гиль, А. Г. Синякин // Бетон и железобетон. 2000. № 4. С. 2–5.
  13. Марцинкевич, В. Л. Энергосберегающая технология ускоренного твердения бетона / В. Л. Марцинкевич. Минск: Навука і тэхніка, 1990. 248 с.
  14. Интенсификация теплообмена при ТВО изделий / В. П. Абрамов [и др.] // Бетон и железобетон. 1988. № 4. С. 10–14.
  15. Миронов С. А. Температурный фактор в твердении бетона / С. А. Миронов. М.: Госстройиздат, 1948. 236 с.
  16. Миронов, С. А. Бетоны, твердеющие на морозе / С. А. Миронов, А. В. Лагойда. М.: Стройиздат, 1975. 158 с.
  17. Рост прочности бетона при пропаривании и последующем твердении / С. А. Миронов [и др.]. М.: Стройиздат, 1973. 95 с.
  18. Малинина, Л. А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона / Л. А. Малинина. М.: Стройиздат. 1977. 159 с.
- Поступила 31.10.2022  
Подписана в печать 03.01.2023  
Опубликована онлайн 31.03.2023
- ЛИТЕРАТУРА
1. Mikhaylov V. V., Karakovsky A. K., Volkov V. S. (1988) New Technology Heat and Moisture Treatment of Structures. *Beton i Zhelezobeton*, (12), 4–10 (in Russian).
  2. Sinyakin A. G. (1995) *Improving the Modes of Hardening of Concrete, Taking into Account the Non-Isothermal Heat Release of Cement*. Kharkov. 18 (in Russian).
  3. Dvorkin L. I., Garnitsky Yu. V. (2000) Designing the Composition of Concrete During Thermal Curing of the Structure. *Beton i Zhelezobeton*, (6), 6–8 (in Russian).
  4. Mchedlov-Petrosyan O. P., Usherov-Marshak A. V., Urzhenko A. M. (1984) *Heat Release During Hardening of Binders and Concretes*. Moscow, Stroizdat Publ. 224 (in Russian).
  5. Shifrin S. A. (1979) *Kinetics of Heat Release of Cement and the Choice of Effective Modes of Thermal Action on Monolithic Concrete*. Moscow. 20 (in Russian).
  6. Lysov V. P. (1984) *Formation of Resource-Saving Technological Processes for the Erection of Structures From Monolithic Concrete*. Moscow. 38 (in Russian).
  7. Bobko F. A. (1998) *Justification of the Modes of Construction of Concrete and Reinforced Concrete Structures Based on the Optimization of the Enrgy Potential of Technological Processes. Research Results, Basics of Modeling and Forecasting*. Minsk. 39 (in Russian).
  8. Akhverdov I. N. (1961) *High Strength Concrete*. Moscow, Stroizdat Publ. 163 (in Russian).
  9. Akhverdov I. N. (1981) *Fundamentals of Concrete Physics*. Moscow, Stroizdat Publ. 464 (in Russian).
  10. Akhverdov I. N. (1991) *Theoretical Foundations of Concrete Science*. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 188 (in Russian).
  11. Shein V. I. (1968) Some Features of Structure-Formation of Concrete at Elevated Temperatures. *Controlled Structure-Formation in the Production of Building Materials*. Kiev, Budivelnik Publ. 34–40.
  12. Usherov-Marshak A. V., Gil Yu. B., Sinyakin A. G. (2000) “Thermobeton-M” – Information Technology of Monolithic Concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concred and Reinforced Concred], (4), 2–5 (in Russian).
  13. Martsinkevich V. L. (1990) *Energy-Saving Technology of Accelerated Hardening of Concrete*. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ. 248 (in Russian).
  14. Abramov V. P., Shmalko V. V., Vinogradov V. P., Solovyanchik A. R., Lomakin N. D., Ovcharenko A. G. (1988) Intensification of Heat Transfer During Heat and Moisture Treatment of Products. *Beton i Zhelezobeton* [Concred and Reinforced Concred], (4), 10–14 (in Russian).
  15. Mironov S. A. (1948) *Temperature Factor in Concrete Hardening*. Moscow, Gosstroizdat. 236 (in Russian).
  16. Mironov S. A., Lagoyda A. V. (1975) *Concrete that Hardens in the Cold*. Moscow, Stroizdat Publ. 158 (in Russian).
  17. Mironov S. A., Frenkel I. M., Malinina L. A., Dmitriev A. S., Zalipaev I. B. (1973) *Increase in the Strength of Concrete During Steaming and Subsequent Hardening*. Moscow, Stroizdat Publ. 95 (in Russian).
  18. Malinina L. A. (1977) *Heat and Moisture Treatment of Heavy Concrete*. Moscow, Stroizdat Publ. 159 (in Russian).
- Поступила 31.10.2022  
Подписана в печать 03.01.2023  
Опубликована онлайн 31.03.2023