

строительстве. При этом следует отметить, что окончательная оценка воздействия Белорусской АЭС на окружающую среду может быть дана только после полного ввода в строй станции и ее практического использования в течение нескольких лет.

#### Список использованных источников

1. Пояснительная записка «Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в Республике Беларусь. Оценка воздействия на окружающую среду. Заявление о возможном воздействии на окружающую среду белорусской АЭС (предварительный отчет об ОВОС белорусской АЭС)». 1588-ПЗ-ОИ4. РУП «БЕЛНИПИЭНЕРГОПРОМ», 2009 г.
2. О государственной экологической экспертизе, стратегической экологической оценке и оценке воздействия на окружающую среду: Закон Респ. Беларусь от 18 июля 2016 № 399-З.
3. Экология теплоэнергетики: электронный учебно-методический комплекс; составители Краецкая О. Ф., Прокопеня И. Н. – энергетический факультет Белорусского национального технического университета, Минск, 2014. – 107 с.

УДК 66.040.25: 519.6: 666.97.035.5

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ГИДРАТАЦИИ ПРИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ БЕТОННОГО ИЗДЕЛИЯ

*Нияковский А.М., ст. преп.*

*Полоцкий государственный университет,  
г. Новополоцк, Республика Беларусь*

Реферат. В статье предложена численная теплофизическая модель для расчёта процессов нагрева и гидратации бетона, основанная на нестационарном трёхмерном уравнении теплопроводности с учётом источника тепловыделения с системой начальных и граничных условий. На её основе выполнены компьютерные расчёты эволюционного пространственного распределения температур и коэффициента гидратации для заданного объекта. Приведён фрагмент вычислений, свидетельствующий о возможности разработанной САЕ системы.

Ключевые слова: температурное поле, нестационарное уравнение теплопроводности, САЕ-системы, кинетика гидратации, тепловая обработка, математическое моделирование, численные методы, разработка методов исследований.

В рамках поставленной задачи исследования к характеристикам процессов нагрева и гидратации отнесены функции распределения в пространстве бетонного тела: температур  $T(x, y, z, t)$ , значений коэффициента гидратации  $H(x, y, z, t)$ , а также скоростей их изменения во времени в точках с координатами  $(x, y, z)$  в любой момент времени  $t$ .

Коэффициент гидратации определялся как  $H(x, y, z, t) = Q(x, y, z, t) / Q_{max}$ , где  $Q_{max}$  – удельная теплота полной гидратации цемента, Дж/кг, а  $Q(x, y, z, t)$  – удельная теплота, выделившаяся при гидратации цемента в точке с координатами  $(x, y, z)$  на момент времени  $t$ .

В качестве основного уравнения для расчёта распределения температуры в пространстве бетонного тела в течение времени тепловой обработки  $t$  при нагреве и гидратации бетона использовалось уравнение теплопроводности, учитывающее экзотермический характер реакции гидратации цемента, которое в указанной постановке имеет вид:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{c_b \rho_b} \left( \frac{\partial \left( \lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( \lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( \lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right)}{\partial z} + \zeta \cdot P_q(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \right), \quad (1)$$

где  $\tau$  – время тепловой обработки, с;  $x, y, z$  – декартовы координаты (ось  $Y$  направлена вертикально), м;  $T(x, y, z, \tau)$  – температура бетона в точке, имеющей координаты  $(x, y, z)$ , в момент времени  $\tau$ , °C;  $\rho_b$  – плотность бетона, кг/м<sup>3</sup>;  $\zeta$  – удельный расход цемента в бетоне, кг/м<sup>3</sup>;  $c_b$  – удельная теплоёмкость бетона, Дж/(кг·K);  $P_q(Q, T)$  – удельная мощность тепловыделения при гидратации цемента (Вт/кг).

Остальные величины, входящие в уравнение (1), расшифрованы в тексте статьи ранее.

Удельная мощность тепловыделения при гидратации цемента в свою очередь определялась из уравнения

$$P_q(Q, T) = \frac{\partial Q(T, \tau_{прив}(Q, T))}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где  $Q$  – удельная теплота, выделившаяся при гидратации цемента к рассматриваемому моменту времени, Дж/кг;  $Q(T, \tau)$  – функция тепловыделения цемента, Дж/кг;  $\tau_{прив}(Q, T)$  – приведённое время гидратации цемента, с, которое определялось как функция обратная  $Q(T, \tau)$  при фиксированном значении  $T(\tau_{прив}(Q, T)) = Q^{-1}(T, Q)$ .

Параллельно с распределением температур в пространстве бетонного изделия производился расчёт распределения тепловыделения и соответствующего ему коэффициента (степени) гидратации цемента согласно уравнению:

$$\frac{\partial Q(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = Q_{\max} \frac{\partial H(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = P_q(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)). \quad (3)$$

Расчёт изменения температуры в различных точках 3-мерного пространства стальной опалубки и конструктивных элементов оборудования производился согласно уравнению теплопроводности в трёхмерной постановке.

Условия изменения температуры  $T_{env}(\tau)$  нагревателя были заданы следующей записью:

$$\frac{\partial T_{env}(\tau)}{\partial \tau} = \begin{cases} (85 - 20) / (4 \times 3600) \text{ } ^\circ\text{C} / \text{с}, & \text{при } 0 \leq \tau < 4 \text{ ч.} \\ 0 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{с}, & \text{при } 4 \text{ ч} \leq \tau < 10 \text{ ч.} \\ -11,25 / 3600 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{с}, & \text{при } 10 \leq \tau < 15,8 \text{ ч.} \\ 0 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{с}, & \text{при } 15,8 \text{ ч} \leq \tau \end{cases}. \quad (4)$$

Выбор начальных и граничных условий осуществлялся с учётом характера тепловой обработки модельного изделия и вида теплотехнической установки для ускоренной гидратации.

На основе вышеперечисленных формул разработана САЕ (система автоматизированного моделирования) для расчёта эволюции процессов нагрева и гидратации бетонных изделий, которая условно названа «ПроГидра-1» («ПРОцессы ГИДРАтации»).

В качестве модельного объекта исследования выбрано неармированное бетонное изделие в форме куба, имеющего размеры 0,3х0,3х0,3 м. Исходная плотность используемого в модели влажного бетона составила:  $\rho_b = 2149$  (кг/м<sup>3</sup>). Средняя удельная

теплоёмкость, исходя из условия аддитивности, равнялась 1058 Дж/(кг·К). Значения теплопроводности бетона  $\lambda_b(H, T)$  при проведении моделирования задавались табулированной функцией, разработанной путём обработки опубликованных экспериментальных данных других авторов [1, 2], и определялись для каждой отдельной точки изделия с координатами  $(x, y, z)$  в зависимости от температуры и коэффициента гидратации в момент времени  $t$ . Для проведения расчёта процессов нагрева и гидратации при выполнении данного исследования методом аппроксимации экспериментальных данных, опубликованных в [3], разработана и использована табулированная функция  $Q(T, t)$ , характеризующая интегральные тепловыделения цемента к моменту времени  $t$  в зависимости от температуры процесса.

Для численного анализа процессов нагрева и гидратации бетона были выделены точки исследуемого объекта  $A_0(0,15;0;0,15)$ ;  $A_1(a=0,0375$  м от  $A_0$ );  $A_2(a=0,075$  м от  $A_0$ );  $A_3(a=0,15$  м от  $A_0$ ), где  $a$  – расстояние между указанными точками. Все эти точки лежали на отрезке, соединяющем центр грани куба с его центром, причём точка  $A_0$  принадлежала грани, а точка  $A_3$  находилась в центре куба. Для выделенных точек  $A_i$  были рассчитаны зависимости изменения температуры и коэффициента гидратации от времени тепловой обработки.

Вычисления производились методом конечных объёмов с использованием сеточной модели. Получены большие массивы данных, фрагмент которых, демонстрирующий возможности разработанной САЕ, представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Численные значения коэффициента гидратации ( $H, \%$ ) и скорости гидратации ( $\partial H/\partial t$ ) от времени тепловой обработки ( $t$ ) в выделенных точках куба  $A_i$  размером  $0,30 \times 0,30 \times 0,30$  м

$t, c$	$H, \%$ ( $A_0$ )	$\partial H/\partial t$ ( $A_0$ )	$H, \%$ ( $A_1$ )	$\partial H/\partial t$ ( $A_1$ )	$H, \%$ ( $A_2$ )	$\partial H/\partial t$ ( $A_2$ )	$H, \%$ ( $A_3$ )	$\partial H/\partial t$ ( $A_3$ )
0	0,0005		0,0005		0,0005		0,0005	
3600	3,79	0,001111	3,699	0,001065	3,651	0,001038	3,629	0,001023
7200	8,495	0,001419	8,117	0,001327	7,877	0,001263	7,743	0,001224
10800	14,52	0,0018	13,77	0,0017	13,26	0,001625	12,95	0,001567
14400	21,9	0,002167	20,79	0,002075	20,01	0,002	19,52	0,00195
18000	30,07	0,002283	28,8	0,002267	27,87	0,00225	27,28	0,002233
21600	38,16	0,002217	36,93	0,002233	36,02	0,00225	35,43	0,002258
25200	45,17	0,001775	44,29	0,001883	43,59	0,001958	43,13	0,002017
28800	50,39	0,001292	49,84	0,001375	49,41	0,001442	49,12	0,001492
32400	54,07	0,0009	53,75	0,00095	53,51	0,001	53,35	0,001033
36000	56,6	0,000617	56,43	0,00065	56,3	0,000675	56,21	0,000692
39600	58,48	0,000508	58,35	0,000508	58,25	0,000508	58,19	0,000508
43200	60,16	0,000442	60,07	0,000458	59,99	0,000467	59,94	0,000467
46800	61,56	0,000358	61,55	0,000383	61,52	0,0004	61,5	0,000417
50400	62,5	0,000217	62,64	0,000258	62,71	0,000292	62,74	0,000308
54000	63,25	0,000208	63,4	0,000208	63,51	0,000217	63,57	0,000208
58800	64,13	0,00015	64,34	0,000175	64,48	0,000183	64,56	0,000192

Как видно из таблицы 1, максимизация скорости гидратации наблюдается в интервале времени тепловой обработки 14400–21600 с. Функция скорости гидратации изменяется подобно Гаусса закону. Однако в интервале времени тепловой обработки 40000–50000 с имеются некоторые отклонения в изменении коэффициента гидратации от этого закона, что связано с прохождением третьего этапа режима термической обработки, сопровождающегося уменьшением температуры. Следует отметить наблюдаемый эффект запаздывания в изменении скорости гидратации ( $\partial H/\partial t$ ), что связано с нестационарностью процесса твердения.

Выводы.

1. Предложена трёхмерная теплофизическая модель для расчёта нестационарных процессов нагрева и гидратации бетонных изделий, учитывающая переменный характер теплопроводности и тепловыделений бетона.

2. В силу особенностей математической постановки разработанная модель может быть использована для теплотехнической оптимизации твердения бетона в изделиях любой 3D-геометрии и композиционного состава с учётом начальных и граничных условий.

#### Список использованных источников

1. Ge, Zh. Predicting temperature and strength development of the field concrete: Retrospective Theses and Dissertations. [Electronic resource] / Zhi Ge // Iowa State University. – 2005. – Mode of access: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2729&context=rtd>. – Date of access: 14.12.2018.
2. Красулина, Л. В. Структурные и теплофизические свойства твердеющего бетона / Л. В. Красулина // Наука и техника. – 2012. – № 2. – С. 29–34.
3. Марьямов, Н. Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки) / Н. Б. Марьямов. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.

УДК 666.9.04.05

## ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЯ НА ПРОЦЕССЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ИЗВЕСТКОВО-БЕЛИТОВЫХ ВЯЖУЩИХ

*Нуримбетов Б. Ч.<sup>1</sup>, к.х.н., доц., Кудайбергенова А. М.<sup>2</sup>, асс.*

<sup>1</sup>*Каракалпакский государственный университет,*

<sup>2</sup>*Нукусский государственный педагогический институт,*

*г. Нукус, Республика Узбекистан*

Реферат. В статье рассмотрено влияние наполнителя на процесс структурообразования в известково-белитовых вяжущих. Установлено, что мрамор ускоряет процесс перехода коагуляционной структуры в кристаллизационной в дисперсиях вяжущего. По результату исследований прочностных свойств известково-белитового вяжущего установлено, оптимальным количеством добавки мрамора можно считать 10 %, так как при этом обнаружен максимум прочности при влажно-воздушном твердении и при термовлажной обработке.

Ключевые слова: известково-белитовый вяжущий, мергель, гидратационные структурообразование, гидратирующаяся фаза, четырехкальциевый монокарбонатный гидроалюминат, мрамор, коагуляционная структура, кристаллизационная структура.

Сырьевым материалом для получения известково-белитового вяжущего (ИБВ) в нашем случае служили природные мергели Республика Каракалпакстан. Установлено [1, 2], что оптимальными режимами термообработки для получения ИБВ на основе изучаемых мергелей является температура в пределах 1000 °С с выдержкой 90 минут. Изучение процессов гидратационного структурообразования (ГС) в концентрированных пастах ИБВ [3, 4], позволяет выявить роль природы гидратирующейся фазы в кинетике формирования прочности и ее создания в возникающей пространственной структуре.

Представляет особый интерес изучение роли карбонатов в качестве наполнителя в процессе структурообразования в дисперсиях ИБВ. Карбонаты в данной работе представлены отходами производства мрамора. Последний не вступает в химическое взаимодействие с гидратом окиси кальция, который содержится в составе известково-белитового вяжущего, но он взаимодействует с трехкальциевым алюминатом, образуя четырехкальциевый монокарбонатный гидроалюминат.

Гидратационное твердение ИБВ сопровождается очень высокими внутренними напряжениями, намного превышающими прочность контактов частиц и поэтому препятствующих образованию прочных структур. В присутствии микронаполнителей отмечается уменьшение размеров кристаллов Ca(OH)<sub>2</sub> и соответственно увеличение числа частиц и кристаллизационных контактов, в результате чего снижаются напряжения и прочность структуры твердения должна повышаться [5].

Изученные соотношения (%) ИБВ к мрамору были 95:5, 90:10 и 85:15. В таблице 1 представлена кинетика структурообразования в системе ИБВ – мрамор – вода. Сам по себе мрамор не дает структуру твердения.