

## МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «БЕТОН-СРЕДА»

В этой связи принципиально важным является создание имитационной модели для количественного изучения изменения во времени структурных характеристик цементного камня в бетоне, находящемся в среде любого вида и степени агрессивности, с учетом созидательных и разрушительных процессов, происходящих в цементном камне в течение длительной эксплуатации строительных конструкций. Для моделирования использовано представление о структуре цементного камня, основанное на группировке его компонентов в блоки по признаку общности функциональных свойств. Относительное содержание негидратированных частиц вяжущего обозначено  $V_1$ , относительное содержание гидратных образований, в том числе модифицированных внешней средой –  $V_2$ ; относительное содержание пустот ( $r \geq 10^{-5}$  м) –  $V_3$ ; относительное содержание продуктов коррозии –  $V_4$ .

При построении связей между компонентами модели приняты следующие допущения:

- в каждом элементарном объеме присутствуют все компоненты модели  $V_i$ , расположенные равномерно по всем координатным осям в соотношении, соответствующем «в среднем» соотношению содержания структурных компонентов в реальном материале;

- на всем временном интервале функционирования модели выполняется условие:

$$\sum_{i=1}^n V_i = 1, i = \overline{1,4} \quad (1)$$

- все компоненты  $V_i$ , находящиеся в единичном объеме, т.е. в элементарном объеме, для которого выполняется условие (1), равнодоступны для взаимодействия с внешней средой и остальными компонентами модели;

- связь каждого компонента  $V_i$  с любым компонентом  $V_j$  непрерывна;

- в модели могут протекать только следующие процессы: «гидратации» компонента  $V_1$ , «извлечения» структурных компонентов  $V_1, V_2, V_4$  «накопления» компонентов  $V_3, V_4$  или линейные комбинации этих процессов;

- интенсивность изменения компонентов  $V_1, V_2, V_4$  для данной среды не зависит от минерального состава их реальных прототипов;

- жидкая фаза в цементном камне представлена химически связанной кристаллизационной, адсорбционной, капиллярной и гравитационной формами и учтена при оценке каждого из компонентов модели.

Отношения между компонентами модели представлены в виде ориентированно взвешенного графа  $G = G(V_i, a_{ij})$ ,  $i = \overline{1,4}$ ,  $j = \overline{1,4}$ . Вершины  $V_i$  соответствую-

ют компонентам модели, имеющим тот же нижний индекс, дуги указывают направления переходов, вес дуги  $a_{ij}$  соответствует интенсивности перехода  $V_i \rightarrow V_j$ , т.е. доле компонента  $V_i$ , перешедшего в компонент  $V_j$  за единицу времени  $\Delta t$ . Тогда по смыслу переходы  $V_1 \rightarrow V_2, V_3 \rightarrow V_2$  описывают созидательные процессы, переходы  $V_1 \rightarrow V_3, V_2 \rightarrow V_3, V_1 \rightarrow V_4, V_2 \rightarrow V_4, V_3 \rightarrow V_4$  – разрушительные.

Объектом исследования служили образцы цементного камня из бетонов изготовленных с использованием 13 цементов, в которых содержание основных клинкерных минералов составляло (в %):  $3CaO \cdot SiO_2 - 41...67$ ;  $2CaO \cdot SiO_2 - 15...33$ ;  $3CaO \cdot Al_2O_3 - 4...9$ ;  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot F_2O_3 - 10...15$ . В качестве внешних воздействий приняты: нормальное хранение во влажной воздушной среде, фильтрация воды с  $pH \sim 5$ , воздействие сульфатсодержащих водных растворов с  $pH \sim 7,5$ , циклическое действие сульфатсодержащего водного раствора и нагревания. Продолжительность испытаний в лабораторных условиях составила 10...12 лет. Численные значения компонентов модели  $V_i$  получены оптикомикроскопическим методом количественного петрографического анализа плоскопараллельных шлифов при участии автора.

Установлено, что компоненты модели  $V_i$  распределены нормально. Методом однофакторного дисперсионного и многомерного статистического анализа показано, что изменение во времени содержания компонентов модели цементного камня статистически связано с изменением прочностных свойств бетона. Это может служить подтверждением содержательности модели [1].

При выводе уравнений модели использован метод динамики средних.

Для каждой вершины любого из графов, показанных на рис. 1, составляли уравнения вида:

$$\frac{dV_i}{dt} = - \sum_{i=1}^p a_{ij} V_i + \sum_{i=1}^p a_{ji} V_j \quad i = \overline{1,p} \quad (2)$$

$$j = 1, 2, 1, \dots, i-1, i+1, \dots, p$$

Для получения численного значения коэффициентов  $a_{ij}(t)$ , характеризующих интенсивность структурообразования, использован специально разработанный метод идентификации, учитывающий ограничения вида (рис. 1), являющиеся неотъемлемой частью метода динамики средних.

Для оценки качества результатов предложенных моделей использована специальная двухэтапная процедура. Все образцы, служившие источником численных значений компонентов  $V_i$ , были разделены на две равные группы. По образцам, вошедшим в первую группу, проводили идентификацию моделей по указанному

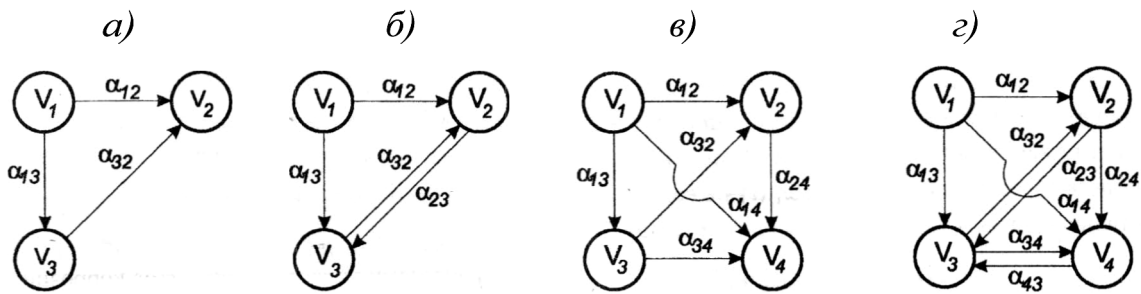


Рис. 1. Графы модели: а – при отсутствии коррозии цементного камня; б – при извлечении компонентов цементного камня; в – при накоплении компонентов цементного камня; г – при совместном протекании процессов типа б и в в цементном камне

алгоритму, а затем оценивали адекватность полученных уравнений на каждом шаге дискретизации по F-критерию с уменьшением числа степеней свободы в числителе на столько единиц, сколько общих элементов  $a_j$  имеется во всех строках соответствующих систем (рис. 1).

Образцы, вошедшие во вторую группу, использованы для оценки предсказательной силы полученных моделей. Результаты идентификации моделей для различных воздействий приведены на рис. 2.

Практически все агрессивные воздействия сред неорганической природы, особенно температурно-влажностные постоянного и циклического характера, вызывают проявление в цементном бетоне созидательных и разрушительных процессов. На основании предложенной модели оказалось возможным описать вклад созидательной составляющей на каждом  $m$ -том шаге моделирования

$$A^{(m)} = a_{12}^{(m)}V_1^{(m)} + a_{32}^{(m)}V_3^{(m)}$$

и разрушительной составляющей

$$B^{(m)} = a_{12}^{(m)}V_1^{(m)} + a_{23}^{(m)}V_2^{(m)} + a_{14}^{(m)}V_1^{(m)} + a_{24}^{(m)}V_2^{(m)} + a_{34}^{(m)}V_3^{(m)}$$

а также определить результирующую характеристику  $C^{(m)} = A^{(m)} - B^{(m)}$

При этом четко зафиксирована стадийность  $C^{(m)}$  практическая независимость интенсивностей  $A^{(m)}$  и  $B^{(m)}$  от минерального состава вяжущего на заключительной стадии взаимодействия бетона с активной средой. Первая стадия – это стадия преимущественного созидания, когда  $A^{(m)} \geq B^{(m)}$ , а вторая стадия преимущественного разрушения ( $A^{(m)} < B^{(m)}$ ).

В результате моделирования были впервые количественно разделены переходы  $V_1 \rightarrow V_2$  и  $V_3 \rightarrow V_4$ , т.е. определены доли цементных реликтов, переходящих в продукты гидратации и продукты коррозии. Это экспериментальным путем до настоящего времени получить никому не удавалось.

Установлено, что на ранних стадиях агрессивных воздействий интенсивность гидратации цементных реликтов ( $a_{12}$ ) в 2...3 раза превосходит интенсивность их коррозии ( $a_{13}$ ,  $a_{14}$ ,  $a_{13} + a_{14}$ ). Затем зависимость постепенно меняется, после чего значение указанных

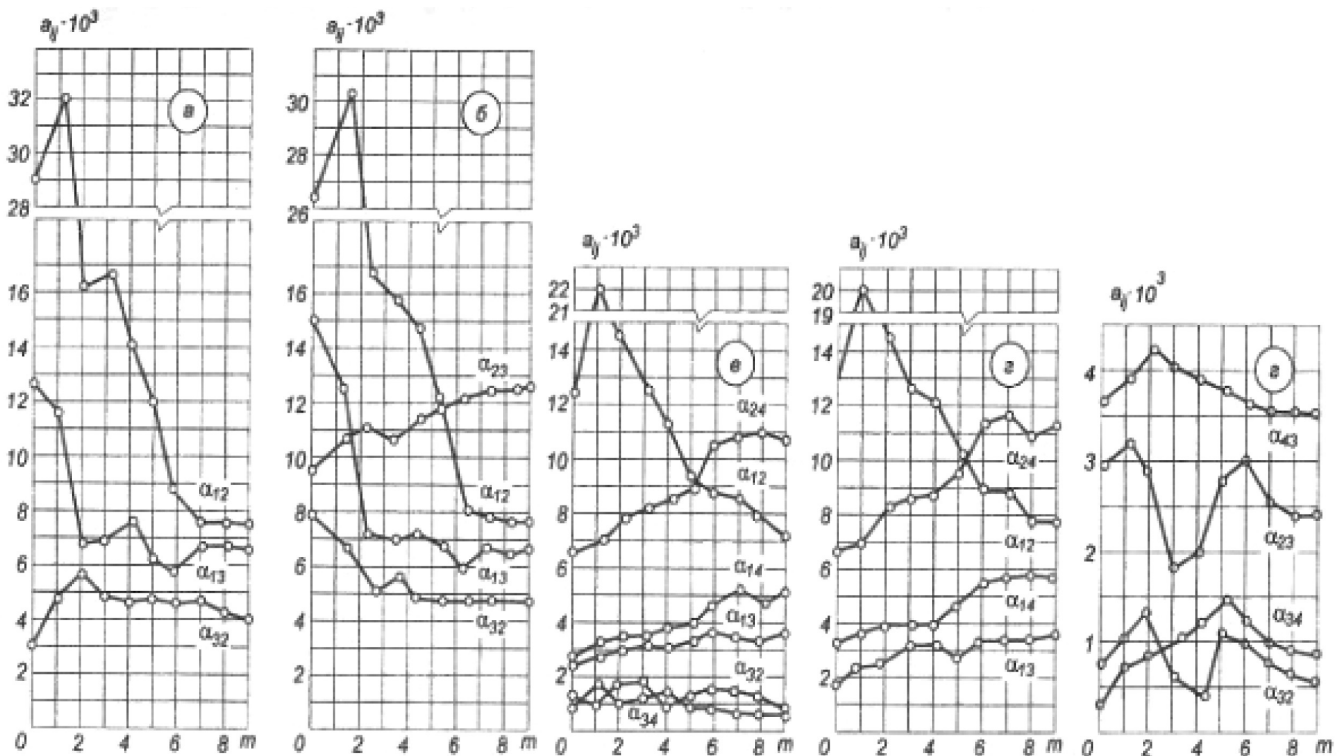


Рис. 2. Результаты идентификации моделей для различных взаимодействий цементного камня с: а – для системы (4), граф показан на рис. 3а; б – для системы (5), граф показан на рис. 3б; в – для системы (6), граф показан на рис. 3в; г – для системы (7), граф показан на рис. 3г

интенсивностей становится примерно одинаковым до тех пор, пока количество цементных реликтов не станет  $V_1^{(m)} \leq 0,15 \dots 0,3$  долей единицы.

Справедливость выбора компонентов модели как характеристик, достаточно полно описывающих цементный камень бетона и происходящие в нем процессы (перехода  $V_i \rightarrow V_j$ ) доказана наличием статистической связи между компонента модели и некоторыми свойствами цементного бетона. В частности, существует достаточно устойчивая связь между критическими уровнями (определяющими период стойкости) доли дефектных участков  $V_3 + V_4 > 0,25$  и соотношением  $\frac{R^{(m)}}{R^{(0)}} < 0,75$ . Также установлено, что структуры цементного камня, изготовленного на портландцементе различного минерального состава, в момент разрушения по компонентам  $V_1$  и  $V_3 + V_4$  становятся статистически неразличимыми, не смотря на различную продолжительность периода стойкости.

Для определения области значений начальных параметров структуры цементного камня (компонентов  $V_i^{(0)}$ ), обеспечивающих поддержание эксплуатационных (прочностных, деформативных, защитных) свойств бетона на эффективном адаптационном уровне, решена задача оптимизации начального состояния цементного камня по требуемой степени гидратации вяжущего (в терминах модели  $r_i = \frac{V_i^{(0)}}{V_i^{(0)}}$ ). Показано, что наибольшему по продолжительности «периоду адаптивности» бетона соответствует значение  $r_i = 1$ . Таким образом, все рассуждения по поводу форсирования степени гидратации цемента (вплоть до полной) в бетоне на стадии изготовления строительных конструкций, эксплуатируемых агрессивных средах можно считать беспредметными. Кроме того, такой вывод убеждает в справедливости интуитивно сложившегося мнения о необходимости резервного потенциала бетона, как материала строительных конструкций, эксплуатирующийся без вторичной защиты. И наконец, такой вывод еще раз подтверждает известный философский принцип, указывающий на то, что ресурсы любой реальной системы, с позиций общей целесообразности, следует искать прежде всего внутри самой системы.

Изучение процессов, связанных со структурированием цементного бетона как проблемы строительного материаловедения насчитывает многие десятилетия. Применение тяжелого бетона все чаще оказывается связанным не только с новым строительством, но и с использованием эксплуатировавшийся некоторое время бетонных и железобетонных конструкций при ремонте и реконструкции строительных объектов. Оценка функциональной пригодности таких конструкций является специфической инженерной задачей, имеющей не только технико-экономическое, но и экологическое значение. Последнее непосредственно связано с определением ресурсного потенциала бетона с целью обеспечения его потребительских характеристик в условиях дальнейшей эксплуатации.

В прошлом сложилась ситуация, когда ученые и практики главное внимание уделяли начальному периоду структурирования бетона, где и были достигнуты определенные успехи. Так, в середине прошлого века впервые обратили внимание на совместное протекание

созидательных и разрушительных процессов, соотношение которых должно было обеспечивать потребительские свойства конечного продукта. Позднее было сделано предположение, что в период службы строительных конструкций сочетание этих процессов в бетоне также может иметь место. Это реализовалось в мыслях о «самозалечивании» и «самоуплотнении» бетона, находящегося в коррозионно-активных средах. Главной причиной такого рода созидательных процессов в основном считали заполнение порового пространства бетона продуктами его коррозии. При этом редко обращали внимание на факт наличия части вяжущего компонента (около половины первоначального количества), которая оставалась невостребованной в ранний период гидратационного структурирования. Здесь следует упомянуть предложения об использовании этого «остатка» путем предварительного домола цемента. Однако бетоны, полученные с использованием таких цементов, оказались неспособными активно сопротивляться действию не только агрессивных сред, но и температурно-влажностных воздействий, которые для бетонов на «стандартных» цементах проявляли ожидаемую реакцию постепенного улучшения механических характеристик во времени. По этой причине возникла мысль вернуться к истокам технологии бетона с учетом современных взглядов на адаптацию искусственных материалов на основе технических силикатов [3], в которых имеется ресурс для адаптационных процессов и могут быть реализованы механизмы их осуществления.

Приспособляемость цементного бетона к действию среды неоднократно, часто в неявной форме, была предметом практического интереса и научных дискуссий в строительном материаловедении. Примерами этого могут служить самоуплотнение в водных и газобразных (в том числе в коррозионно-активных) средах, самоупрочнение при умеренных термических, особенно циклических воздействиях, повышение трещиностойкости и снижение необратимой части усадки при раннем силовом и коррозионном нагружении, стабилизация (после некоторого спада) прочностных и деформативных свойств при действии высоких температур, а также длительного насыщения маслами и эмульсиями (рис. 3).

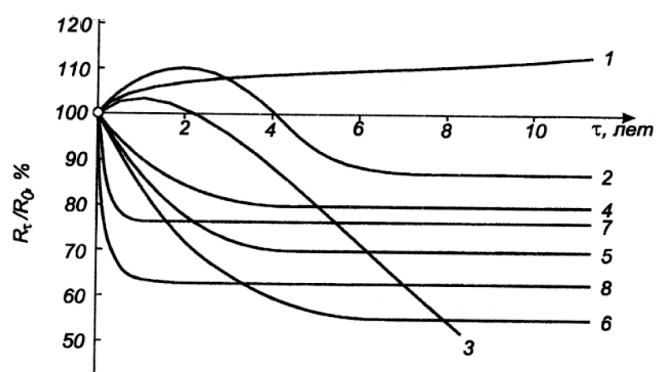


Рис. 3. Изменение во времени относительной прочности тяжелого бетона на портландцементе: 1 – нормальные условия; 2 – действие водного сульфатсодержащего раствора слабой степени агрессивности; 3 – то же сильной степени агрессивности; 4 – циклическое действие нагрева при 90°C и увлажнения; 5 – то же при 180°C; 6 – действие минерального масла; 7 – действие постоянного нагрева при 300°C; 8 – то же при 500°C

Эти примеры позволяют предположить, что бетон, пребывающий в определенных условиях среды, приобретает признаки, удовлетворительные для этих условий. Длительное сохранение (после изменения) на некотором уровне прочностных и деформативных свойств бетона может происходить при двух допущениях: во-первых и прежде всего, когда действие среды не вызывает катастрофического разрушения материала, и, во-вторых, когда параметры среды достаточно длительное время остаются практически неизменными.

Согласно приведенному ранее определению структурно-функциональной адаптации, она представляет собой совокупность процессов, определяющих приспособление бетона к изменению окружающих условий, и направлена на удержание существенных переменных внутреннего состояния в некоторых пределах и удовлетворительного спектра функциональных свойств. В общем случае адаптация системы «бетон-среда» – это путь достижения физико-химической целесообразности ее структуры и технического поведения.

Применительно к цементному бетону следует различать существенное, связанное с потребительскими свойствами (прочность, деформативность, стойкость), и второстепенное, связанное с морфологическими характеристиками новообразований в цементном камне, заполнителе и зоне их контакта. Изменения, происходящие в цементном бетоне в процессе структурно-функциональной адаптации, касаются всех уровней: от кристаллизационно-

агрегатного до целостного. Большое значение в формировании адаптационной активности бетона имеет его физико-химическая восприимчивость, зависящая в основном от наличия фонда вяжущего и исходного структурно-функционального состояния. Естественно, адаптационные возможности цементного бетона не беспредельны и существенно зависят от условий эксплуатационной среды.

В реальной обстановке функционирование цементного бетона происходит при непрерывных изменениях как внутри материала, так и вне него. Процессы в бетоне, которые приводят к изменению его состояния, происходят при соблюдении трех условий: характера окружающей среды, изменения внутренних параметров и особенностей режима функционирования материала в конструкции. При этом в системе происходят изменения, направленные прежде всего на сохранение стационарного неравновесного состояния [1], т.е. цементный материал адаптируется, приспособляясь к изменившимся условиям эксплуатации.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Чернявский В.Л. О сопротивляемости цементного бетона действующей среды // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1991. – №3. – С. 57–60.
2. Чернявский В.Л. Повышение антикоррозионных свойств бетона. - Киев: Будівельник. – 1983. – 88 с.
3. Чернявский В.Л. Адаптационные особенности материалов на основе технических силикатов // Техника и технология силикатов. – 1995. – №3–4. – С. 37–41.

### **ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ В ЖУРНАЛ “СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ”**

1. Рукопись должна быть тщательно проверена и подписана всеми авторами. Дальнейшие исправления и дополнения не допускаются.

Объем статьи:

- а) обзорного характера – до 7 стр.;
- б) решение конкретной научной задачи – до 5 стр.;
- в) краткое сообщение о достигнутых результатах – до 2 стр.

2. Рукописи статей, превышающих указанные объемы, к рассмотрению не принимаются.

3. Одновременно с рукописью подаются реферат, справка об авторах (фамилия, имя, отчество, научная степень, ученое звание, номер телефона, название организации), дискета с файлами статьи и реферата.

4. Реферат подается напечатанным на одном листе. Шапка реферата: индекс УДК, название статьи, фамилии и инициалы авторов, количество рис., табл., библиограф. ссылок. Объем реферата – не более 1/3 страницы.

5. Рукопись статьи подается в двух экземплярах, напечатанной (шрифт – 14 пт, 30 строчек на странице). Тексты статьи и реферата подаются отдельными файлами на дискете. Текст должен быть набран в редакторе MS WORD. Рисунки, фотографии подаются отдельно (оригиналы).

6. Шапка статьи: в левом углу представляется индекс УДК, ниже по центру – фамилия, имя, отчество, научная степень, ученое звание, номер телефона, название организации, под ним ниже по центру – заголовок (большими буквами).

7. В статье должны использоваться единицы Международной системы (СИ).

8. Формулы и обозначения набираются в MS WORD (формульном редакторе Equation).

9. Перечень литературы оформляют в соответствии с ГОСТ 7.1-84 и подают общим списком в конце рукописи.

10. В статью могут быть внесены изменения редакционного характера без согласования с автором.

11. Окончательный вывод о публикации принимает редакционный совет.

Консультации по поводу оформления статей можно получить ежедневно с 10 до 15 час. в НИИСМИ,  
тел. (044) 417-07-15, тел./факс 417-62-96