

Рис. 8. Диаграмма работы стыка затяжек при нагружении.

Таблица 3. Усилия в стержнях арки по оси X11

Элемент арок	Профиль	$A$ , см <sup>2</sup>	$\Delta l$ , мм	Усилие, кН		
				по расчету	экспериментальное	на проектную нагрузку
П1	тр.127x6	22,81	0,041	125,6	102,3	248,9
П2	тр.127x6		0,042	98,5	93,9	215,4
П3	тр.127x6		0,032	93,5	74,5	195,4
П4	тр.127x6		0,055	109,3	117,9	237,7
П5	тр.127x6		0,043	109,3	96	237,7
П6	тр.127x6		0,034	93,5	79,8	195,4
П7	тр.127x6		0,048	98,5	104,5	215,4
П8	тр.127x6		0,038	125,6	99,7	248,9
Нижний пояс	тр.426x14	181,21	-0,042	-930	-921	-1769,8
Затяжка	тр.325x14	136,78	0,072	777	1005,1	1507,4

В результате исследования усилий в стержнях арок, установлено относительное соответствие усилий, полученных в результате статического расчета по ПК «ЛИРА» 9.2 и полученных экспериментальным путем в результате натурных испытаний путем нагружения конструкции покрытия испытательной нагрузкой. Процент расхождения результатов изменяется в пределах 10% для подвесок (запас 50-60%), 1% для опорного стержня нижнего пояса арки (запас 48%), и 22.6 для затяжки (запас 33%). Результаты усилий в стержнях арки по оси X11 сводим в таблицу 3.

Сварные узлы арок выполнены безраскосными и имеют запас несущей способности не менее 5 раз.

Максимальные напряжения в сварных швах фланцевых соединений отправочных марок равняются 123,2 МПа, при расчетном сопротивлении стали шва 215 МПа. Несущая способность сварных швов соединения подвесок с затяжками и

узлами нижних поясов арок составляет 631,9 кН, при расчетном значении усилия в подвеске 125,6 кН.

Лабораторные испытания узлов подтвердили безотказную работу наиболее нагруженных элементов и наличие значительного дополнительного запаса их несущей способности, при сравнении расчетных и допустимых усилий и разрушающих нагрузок.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- В.И. Драган., А.Б. Шурин и др. Исследование, расчет и испытание большепролетного металлического покрытия здания универсального спортивного комплекса в г. Бресте. Архитектура и строительство – 2005: Сб. трудов I международного научно - практического семинара, Брест, 22-23 сентября 2005 г. – С 43-54.
- В.В. Горев. Металлические конструкции. Конструкции зданий. Т. 2. – Москва: «Высшая школа», 2002. – 528 с.

УДК 691.32(043.3)

**Разумейчик В.С.**

## СТРУКТУРНО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАТАЦИИ ЦЕМЕНТНОГО КОМПОЗИТА

### Введение

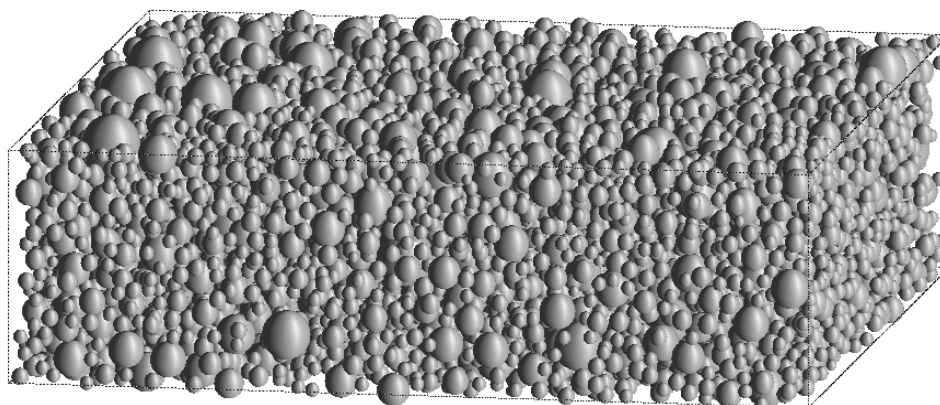
Имитационное моделирование цементных композитов, базирующееся на известных физико-химических закономерностях процессов, происходящих в материале, а также на

широком использовании возможностей современных компьютерных технологий, является эффективным инструментом их исследований.

*Разумейчик Вита Станиславовна, аспирант кафедры «ЭВМ и системы» Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*

*Строительство и архитектура*



**Рис. 1.** Модель макроскопической подсистемы исходной цементной структуры. Размер области моделирования  $500 \times 500 \times 200$  мкм<sup>3</sup>, подсистема состоит из 295 000 дисперсных частиц диаметром 3...37 мкм (изображено 10 000 частиц диаметром 5.5...37 мкм).

Наибольший эффект от имитационного моделирования может быть достигнут при условии системного рассмотрения всех базовых аспектов материаловедения в целом, а именно – состава, структуры и свойств исследуемого материала. При этом изучение эволюции состава материала (химическое моделирование) и его структуры (структурное моделирование) представляются базовыми, первичными составляющими системной материаловедческой модели.

В данной работе изменение химического состава гидратирующей цементной системы рассматривается в непосредственной взаимосвязи с ее внутренней структурой, образуемой дисперсными частицами.

#### Статистические свойства начальных дисперсных структур

Адекватное моделирование процессов гидратации цементной системы требует создания соответствующих программных средств генерации ее сложной трехмерной структуры. Для этой цели наиболее пригодным оказалось применение внерешеточного метода моделирования, т.е. размещения составляющих систему элементов без использования какой-либо пространственной сетки [1, 2]. Представление моделируемой системы на регулярной решетке, аналогичное трехмерной модели Д. Бенца [3], либо не позволяет добиться требуемой плотности упаковки, либо не обеспечивает макроскопической однородности расположения дисперсных частиц.

Внерешеточный метод относится к группе алгоритмов случайного набрасывания частиц сферической формы без перекрытия. В результате проведенных на его основе вычислительных экспериментов установлено, что достижимый коэффициент упаковки составляет: для сфер одного диаметра – 0,35, для типовых распределений размера зерен цементного порошка – 0,56 и более.

Свойства дисперсной структуры как макроскопической системы, состоящей из огромного количества отдельных частиц, согласно основным принципам статистической физики, подчиняются статистическим же закономерностям [4]. Выделенные из нее относительно малые, но также макроскопические подсистемы, имеют независимые друг от друга статистические распределения физических и структурно-геометрических параметров, поэтому такие распределения для некоторой подсистемы можно считать вполне репрезентативными в отношении всей системы. Сказанное относится, в частности, к распределениям размера дисперсных частиц, а также координат центров в объеме системы и ее макроскопи-

ческой подсистемы. Так, например, изотропия свойств дисперсного материала подразумевает статистически равномерное расположение частиц в пределах исследуемого объема.

В ходе эксперимента было проведено моделирование исходной цементной структуры как макроскопической подсистемы со следующими характеристиками: общий модельный объем –  $500 \times 500 \times 200$  мкм<sup>3</sup>, водоцементное отношение ( $w/c$ ) = 0.45, распределение размера частиц – соответственно гранулометрическому составу порошка Portland Cement 115. Изображения получаемых размещений (рис. 1) вполне реалистичны.

В результате анализа плоских срезов в центральной области и на границах моделируемого объекта (рис. 2), было выявлено, что коэффициент упаковки на границах системы значительно (почти на 40%) ниже, чем в центральной зоне, а распределение по размерам сечений заметно смещается в сторону больших радиусов, что обусловлено влиянием так называемого граничного эффекта. Для исключения такого влияния далее рассматривалась только центральная область сгенерированного объекта размером  $500 \times 500 \times 100$  мкм<sup>3</sup>.

Поскольку не все генерируемые случайным образом координаты центров шаров являются допустимыми для размещения шаров без перекрытия, а с увеличением плотности упаковки количество неудачных попыток стремительно возрастает, макроскопическая однородность и изотропность моделируемой системы (равновероятное распределение координат центров частиц в достаточно большом объеме) не являются очевидными. Поэтому свойство однородности проверялось путем сопоставления структурно-геометрических параметров, определяемых по всему объему системы и по ее произвольному плоскому срезу.

Ранее были установлены выраженные в виде интегральных уравнений закономерности взаимосвязи важнейших структурных параметров изотропных дисперсных систем – распределения частиц по размерам и соотношению объемов (масс) дисперсионной среды и частиц – с аналогичными плоскостными характеристиками, определяемыми путем анализа плоских сечений таких систем [5]. Эти закономерности использовались в данной работе для анализа модельных образцов.

Для получения статистически значимых результатов выполнялась серия вычислительных экспериментов из 20 опытов, находилось общее по всем экспериментам распределение размера сечений частиц, которое затем сравнивалось с распределением, рассчитанным согласно упомянутым закономерностям. Полученные результаты сведены в таблицу.

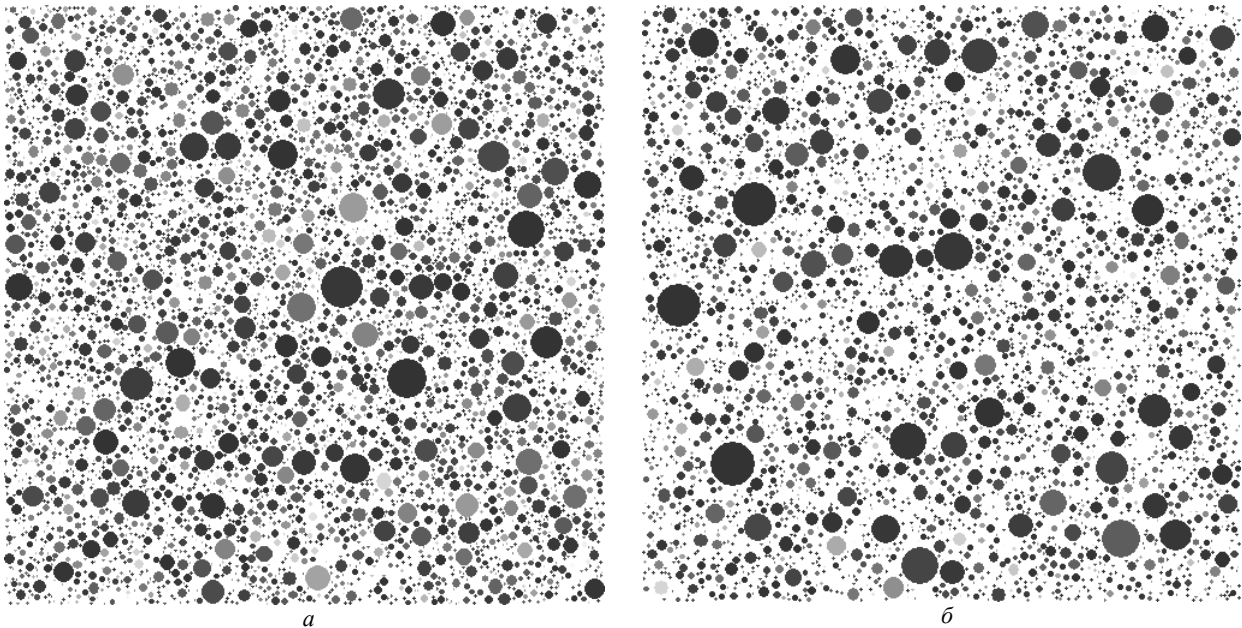


Рис. 2. Изображения сечений, выполненных в центре (а) и на границе модельного образца (б). Тоновая визуализация - от светлого к темному - соответствует диапазону 0...1 отношений диаметров сечения частицы в плоскости среза и ее центрального сечения.

Таблица 1. Сравнительный анализ теоретического и эмпирического распределений размера сечений зерен в плоском срезе дисперсной системы

Диапазон диаметра зерен, мкм	Количественная доля зерен	Количественная доля сечений в плоском срезе	
		теоретическая ( $n_i$ )	эмпирическая ( $v_i$ )
35 – 37	0,76590	0,000094546	0,000066359
33 – 35	0,14840	0,000067919	0,000018960
31 – 33	0,05070	0,000187915	0,000170639
29 – 31	0,01440	0,000290303	0,000312838
27 – 29	0,01000	0,000396436	0,000464517
25 – 27	0,00410	0,000611082	0,000587756
23 – 25	0,00230	0,001166059	0,001194471
21 – 23	0,00150	0,001604389	0,001744307
19 – 21	0,00090	0,002304606	0,002246744
17 – 19	0,00063	0,003188591	0,003223177
15 – 17	0,00042	0,004789661	0,004948524
13 – 15	0,00033	0,006900508	0,006872950
11 – 13	0,00015	0,010831919	0,010693362
9 – 11	0,00009	0,021645855	0,021765922
7 – 9	0,00007	0,030504927	0,029833343
5 – 7	0,00005	0,077940854	0,077299357
3 – 5	0,00001	0,182215545	0,182099994
2 – 3	0,00003	0,479751979	0,480774700
менее 2	–	0,175506949	0,175682081

Статистическое соответствие распределений оценивалось по критерию согласия Пирсона (обозначения входящих в формулу переменных раскрыты в головке таблицы):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{19} \frac{(n_i - v_i)^2}{v_i} = 10,039.$$

Критическое значение критерия для 18 степеней свободы (19 интервалов, неизвестные параметры равномерного распределения отсутствуют) и доверительной вероятности 0.90 составляет 10,865. Таким образом, простая непараметрическая гипотеза о равновероятном распределении координат

центров дисперсных частиц в пределах модельного объема принимается с уровнем значимости не более 0,1.

**Моделирование гидратации цементной системы с помощью трехмерного клеточного автомата**

Для моделирования процессов гидратации цементной системы представляется целесообразным применение метода конечных разностей, реализуемого с помощью клеточного автомата с континуальным (непрерывным) множеством состояний. Адекватность моделирования физико-химических процессов посредством клеточных автоматов с конечным числом состояний может быть достигнута лишь за счет значительного размера такого автомата (малого модельного объема одной клетки), что повлечет за собой неприемлемое увеличение требуемых ресурсов памяти и быстродействия компьютера.

В связи с этим возникает задача перехода от внеячейковой модели дисперсной системы к ее решеточному представлению. Поскольку полидисперсная система – это сложная гетерогенная система, состоящая из различных по химическому составу и размеру частиц, поставленная задача не является тривиальной даже для регулярного автомата. Так, с точки зрения точности и быстродействия модели, неочевидными являются как назначение шага сетки для трехмерного представления системы, так и выбор метода определения объема каждой дисперсной фазы во всех ячейках автомата (вычисления объема части шара). Для решения последней задачи был проанализирован ряд методов, а именно – непосредственного и численного интегрирования, сеточного приближения и Монте-Карло. Выявлены недостатки первых трех методов – высокая вычислительная сложность либо низкая точность вычислений, поэтому был выбран метод статистических испытаний Монте-Карло.

Алгоритм решеточного преобразования по методу Монте-Карло заключается в следующем. С помощью генератора случайных чисел получали набор пробных точек, равномерно распределенных внутри кубической ячейки. Каждую точку проверяли на принадлежность каждой фазе. Так как зерна дисперсной фазы приближаются сферами, то процедура проверки заключалась лишь в нахождении расстояния от пробной точки до центра зерна и сравнении его с радиусом зерна. Концентрация каждой фазы в любой ячейке моделируемой системы определялась как отношение количества точек, принадлежащих дисперсной фазе, к общему количеству пробных точек.

Используемый для моделирования трехмерный клеточный автомат является векторным. Каждая кубическая ячейка такого автомата описывается набором следующих значений: объемными концентрациями исходных веществ ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $CA$ ,  $C_4AF$ ,  $Gyp_s$ ), молярными концентрациями продуктов растворения (ионов  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$ ,  $H_2SiO_4^{2-}$ ,  $Al(OH)_4^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ), объемными концентрациями новообразований ( $CH$ ,  $C_{1,5}SH_{2,5}$ ,  $C_3AH_6$ ,  $ETTR$ ,  $MONO$ ,  $AH_3$ ,  $FH_3$ ), а также общим объемом содержащегося в ячейке раствора, концентрацией чистой воды в растворе и объемом пор (дефицитом объема ячейки).

Правила перехода для данного клеточного автомата составлялись с учетом различных процессов, происходящих при гидратации цементной системы: растворения исходных веществ в воде, диффузии продуктов растворения, химических реакций с образованием новых веществ. Первые два процесса – растворение и диффузия – моделируются по одной из расчетных схем метода конечных разностей, а третий процесс – химические реакции – непосредственно внутри каждой ячейки автомата согласно известным схемам реакции составляющих цементную систему компонентов.

Поскольку все три процесса протекают, в общем случае, одновременно, соответствующие им три процедуры моделирования выполняются поочередно и циклически. Важнейшее значение при этом имеет выбор шага модельного времени, обеспечивающего необходимую точность расчетов и приемлемое общее время моделирования. Известно, что со временем процесс гидратации замедляется, поэтому предусмотрена возможность изменения шага времени (как правило, его увеличения на более поздних этапах).

Моделирование процесса растворения происходит следующим образом. Для каждой из ячеек системы определяются соседние ячейки, содержащие жидкую фазу (раствор). Так, как концентрации всех веществ в начальный момент времени

известны, можно вычислить концентрацию  $C_i^{t+\Delta t}$   $i$ -го вещества через некоторый шаг времени  $\Delta t$ :

$$C_i^{t+\Delta t} = f(C_i^t, r_i^t, \Delta t), \quad (1)$$

где  $C_i^t$  – концентрация  $i$ -го вещества в ячейке в текущий момент времени,

$r_i^t$  – скорость растворения  $i$ -го вещества в текущий момент времени.

Скорость растворения меняется со временем и зависит от концентрации  $C_{H_2O}^t$  чистой воды в растворе соседней ячейки и константы  $k_i$  скорости растворения минерала:

$$r_i^t = f(C_{H_2O}^t, k_i). \quad (2)$$

Если расчетную ячейку окружают несколько ячеек с раствором, растворение содержащихся в расчетной ячейке минералов осуществляется последовательно по всем направлениям (во все соседние ячейки).

После вычисления концентрации растворенного вещества определяется его объем и количество молей, а по молярной стехиометрии реакции растворения – количество молей и объем потраченной на растворение воды, а также количество молей, перешедших в раствор ионов растворенного вещества (которые затем будут диффундировать в растворе, поэтому далее будем называть их «диффузионными частицами»).

Далее следует этап моделирования диффузии гидратных продуктов в дисперсионной среде (растворе). Процесс диффузии описывается следующим разностным уравнением:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_i \left( \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

где  $C_i$  – концентрация диффузионных частиц  $i$ -го вещества в ячейке,

$D_i$  – коэффициент диффузии  $i$ -го вещества,

$\partial x$ ,  $\partial y$ ,  $\partial z$  – шаг расчетной сетки по трем координатам

(для кубических ячеек  $\partial x = \partial y = \partial z = h$ ).

Данное дифференциальное уравнение можно решить численно методом центрально-разностной аппроксимации. Концентрация диффузионных частиц в кубической ячейке размером  $h^3$  через время  $\Delta t$  определяется следующим образом:

$$C_i(x, y, z, t + \Delta t) = \frac{D}{h^2} [C_i(x+h, y, z, t) + C_i(x-h, y, z, t) + C_i(x, y+h, z, t) + C_i(x, y-h, z, t) + C_i(x, y, z+h, t) + C_i(x, y, z-h, t) - 6C_i(x, y, z, t)] \Delta t + C_i(x, y, z, t), \quad (4)$$

где  $C_i(x, y, z, t)$  – концентрация диффузионных частиц  $i$ -го вещества в текущий момент времени,

$C_i(x, y, z, t + \Delta t)$  – концентрация диффузионных частиц  $i$ -го вещества через время  $\Delta t$ .

Так как диффузия различных веществ осуществляется с различной скоростью, пересчет концентраций для всех диффундирующих веществ должен осуществляться параллельно и независимо друг от друга.

Существуют условия устойчивости, которые обеспечивают лучшую аппроксимацию при конечном шаге сетки. Шаг

сетки  $h$  и времени  $\Delta t$  должны быть достаточно малыми, кроме того, должно выполняться условие:

$$\Delta t < \frac{1}{2D} h^2 \quad (5)$$

С учетом данного условия, и принимая во внимание тот факт, что диффузия может происходить со скоростью, в несколько раз превышающей скорость растворения минералов, шаг времени для диффузии должен быть, как минимум, в такое же количество раз меньшим, чем общий для гидратации шаг модельного времени. В этом случае на один шаг растворения следует выполнять несколько шагов диффузии.

Далее выполняется этап моделирования химического взаимодействия (кристаллизации), основанный на следующей схеме: если в ячейке с раствором присутствуют ионы необходимых для реакции веществ, они вступят в реакцию с единичной вероятностью, что влечет образование новых твердых веществ, некоторые из которых также могут затем раствориться или диффундировать в растворе.

### Результаты расчета фазовых переходов при гидратации цементной системы

Для вычислительных экспериментов была создана программная система, реализующая описанный выше клеточный автомат. Исходные характеристики модели: химико-минералогический и гранулометрический состав цемента, водоцементное отношение, схема возможных химических реакций, молярная масса и плотность каждого из компонентов реакций, константы скоростей реакций и коэффициенты диффузии, температура гидратации – приняты идентичными теоретической модели цементной системы, изложенной в [6]. Каждый этап моделирования заканчивался пересчетом молярной и объемной концентраций веществ в каждой ячейке модельного объема, суммарного (по всем ячейкам) объема веществ, а также вычислением степени гидратации цементного композита (отношения объема непрореагировавших веществ к начальному объему исходных веществ). По промежуточным данным была построена диаграмма состояния (фазовых переходов) цементной системы, представленная на рис. 3.

Ожидаемым образом, при достижении степени гидратации 0,5 процесс резко и значительно замедляется, что соответствует известным закономерностям кинетики гидратации цементных материалов. Адекватность модели подтверждается также качественным сходством полученной диаграммы с аналогичной диаграммой, представленной в [6]. Некоторые количественные отличия в соотношении объемов основных фаз связаны с принципиальными отличиями разработанной модели в части микроструктуры системы, а именно: различным размером модельных частиц в пределах любой дисперсной фазы и нерегулярностью их взаимного расположения.

Полученная диаграмма состояния позволяет обнаружить также другие существенные особенности процесса гидратации:

1) При достижении степени гидратации примерно 0,6 процесс практически останавливается (диаграмма изображена именно в таком диапазоне параметра по оси абсцисс). Детальный анализ состояния клеточного автомата на этом этапе гидратации показал, что в ячейках, непосредственно примыкающих к частично растворенным зернам исходных минералов, вода присутствует в исчезающем количестве. Напротив, количество твердых продуктов реакций кристаллизации в этих ячейках весьма значительно, что может соответствовать образованию вокруг зерен практически непроницаемых оболочек, которые и препятствуют доступу воды к поверхности минералов.

2) В диапазоне степени гидратации 0,5...0,6 (период интенсивной кристаллизации) наблюдаются скачкообразные изменения объемных концентраций некоторых новообразований (в особенности –  $CSH$ ,  $CH$ ,  $AH3$ ). По-видимому,

это также обусловлено конкретной микроструктурой системы в модельном объеме (материалом, размером и расположением дисперсных частиц).

3) Примерно в этом же диапазоне степени гидратации происходит существенное уменьшение объема пустого порового пространства (эта фаза на диаграмме обозначена белым цветом). Данный факт подтверждает обсужденные выше соображения, поскольку стехиометрические коэффициенты реакций однозначно указывают на увеличение объема твердых продуктов кристаллизации по сравнению с объемом исходных веществ.

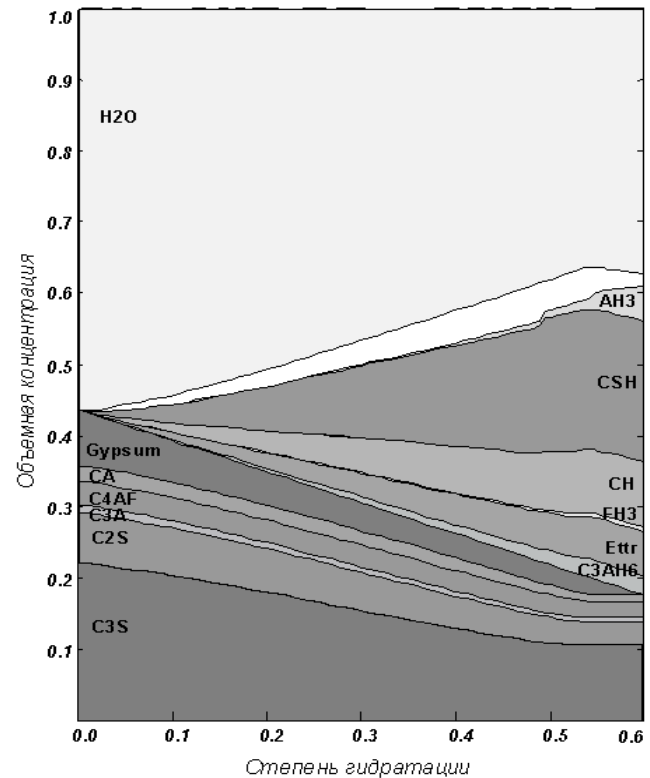


Рис. 3. Диаграмма состояния цементной системы.

Таким образом, разработанная модель гидратирующей цементной системы вполне адекватно отражает как химические, так и структурные аспекты процесса в диапазоне степени гидратации 0...0,6. Для изучения дальнейшей гидратации модель должна быть развита следующим образом.

Во-первых, путем анализа количества твердых продуктов реакций кристаллизации в соседних ячейках, с позиций теории перколяции, необходимо обнаружить и зафиксировать образование новых структурных элементов, например, первичных оболочек зерен.

Во-вторых, ожидаемое (при дальнейшем уменьшении объема порового пространства) общее расширение гидратирующей системы можно моделировать за счет соответствующего увеличения объема каждой ячейки. Исходя из закона сохранения вещества, такое увеличение вызовет снижение концентрации (удельного содержания) растворенных веществ в ячейке и появление новых поровых пустот, твердые же структурные элементы – первичные оболочки – будут при этом претерпевать разрушение (нарушение связности в соседних ячейках).

В третьих, возможное разрушение первичных оболочек обеспечит доступ воды к поверхности минералов, т.е. продолжение реакций гидратации. Конечно, образующиеся продукты реакций «восстановят» оболочки, но они впоследствии будут разрушаться, как указано выше. Циклическое повторение дан-

ного эффекта прекратится, когда постепенно снижающийся коэффициент расширения системы будет уже недостаточным для разрушения твердых структурных элементов (в таком случае их необходимо считать вторичными оболочками).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дереченник С., Разумейчик В., Тур В. Внерешеточные модели дисперсных фаз в исследованиях структуры цементных композитов / Строительство на основе оптимизированного энергетического потенциала: Материалы III Междунар. научно-техн. конф. – Czenstochova, 2005.
2. Ballani F, Daley D.J., Stoyan D. Modelling the microstructure of concrete with spherical grains // Computational Materials Science. – 2006. – Vol. 35. – P. 399-407.

3. Bentz D.P. Three-dimension computer-simulation of Portland-cement hydration and microstructure development // Journal of the American Ceramic Society. – 1997. – Vol.80, No.1. – P. 5-21.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: В 10 т. – Т.V: Статистическая физика. – Ч. I. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 616 с.
5. Дереченник С.С., Разумейчик В.С., Тур В.В. Закономерности топологической неупорядоченности в плоских сечениях и объемах дисперсных систем // Вестник БГТУ. Сер. Строительство и архитектура. – 2005. – № 2 (32). – С. 18-25.
6. Филимонова Н.В., Тур В.В. Приложения к расчету базовых параметров обобщенной модели расширяющейся цементной системы // Вестник БГТУ. Сер. Строительство и архитектура. – 2006. – №1 (38). – С. 23-40.

УДК 622.691.5

*Осипов С.Н., Савастиенок А.Я.*

### РОЛЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛНОГО СОРТАМЕНТА ТРУБ В РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Среди нескольких показателей экономического развития Республики Беларусь числится ресурсосбережение. Этот показатель является чрезвычайно важным, но одновременно весьма сложным для нашей экономики. Необходимость использования в целях ресурсосбережения всего сортамента труб можно показать на примере проектирования систем газоснабжения.

На своем пути к потребителю газ проходит следующие стадии: добыча, транспортировка по магистральным газопроводам и распределительным сетям высокого, среднего и низкого давлений. Ресурсосбережение возможно на каждой из перечисленных стадий. Это, например, использование более прогрессивных методов разведки и разработки газовых месторождений, оптимизация потокораспределения в магистральных сетях, использование передовых методов эксплуатации, проектирования и строительства газопроводов, включающих в себя использование более экономичных материалов, технологий строительства и монтажа газопроводов.

Развитие систем распределения природного и сжиженного газов происходит в три основных этапа: проектирование, строительство и эксплуатация. Техничко-экономические характеристики каждого последующего этапа зависят от качества проведения работ на предыдущих этапах. Это значит, что вопросам проектирования систем газоснабжения должно уделяться особое внимание. На этой стадии определяются все основные технико-экономические показатели систем, играющие важную роль в последующем их развитии. Поэтому резервы снижения затрат на строительство и эксплуатацию систем газоснабжения должны выявляться ещё в процессе проектирования.

В процессе проектирования систем газоснабжения можно выделить три этапа принятия решений. Первый этап – выбор типа проектируемой системы или основных принципов её построения. На этом этапе производится выбор вида газа, числа ступеней давления в системе газоснабжения и т.д. Второй этап – выбор структуры проектируемой системы. На этом этапе устанавливается целесообразность отдельных элементов системы, их числа и связи между собой. Определяется число и размещение газорегуляторных пунктов, размечаются трассы газовых сетей, выбирается степень их закольцованности и т.д. Третий этап – параметрическая оптимизация, на котором в рамках выбранной на предыдущем этапе структуры определяются параметры проектируемой системы, полностью

конкретизируются все проектируемые элементы системы. На этом этапе в результате гидравлических расчетов и происходит определение значений диаметров участков газовой сети. Методику гидравлического расчета можно рассматривать как состоящую из факторов, влияющих на стоимость строительства и эксплуатации газовой сети. Факторами, не зависящими от методики расчета, являются: длина и путевой расход участков сети, расчетный перепад давления в направлении, режим движения газа, материал газопровода, количество типоразмеров диаметров труб. Факторами, зависящими от методики расчета, являются: первоначальное расчетное потокораспределение; распределение расчетного перепада давления по направлению; принцип подбора диаметров труб. На основании оптимизации факторов, зависящих от методики расчета, и определения экономичных уровней факторов, не зависящих от методики расчета, на базе исследований проф. Левина А.М. нами разработана экономичная методика гидравлического расчета газовых сетей, позволяющая сокращать массу стальной газовой сети до 11%. При этом вклад каждого фактора в ресурсосбережение при проектировании газовых сетей определяется использованием экономичных уровней других факторов. Например, распределение расчетного перепада давления по участкам сети из условия экономичности предполагает, что будут подобраны такие диаметры газопроводов, которые сохраняют в сети это оптимальное, с точки зрения ресурсосбережения, распределение давления по участкам сети. В случае, если сортамент диаметров труб ограничен, в сети невозможно сохранить это оптимальное распределение давления. Так, результат расчета газовой сети поселка Дроздово Минского района по разработанной нами программе минимизированного по материалоемкости гидравлического расчета с использованием различного количества типоразмеров диаметров представлен в таблице 1.

Из таблицы видно, что снижение массы сети только за счет использования увеличенного сортамента трубопроводов составляет 4468 кг или 3,3%.

При проектировании распределительных газовых сетей наиболее часто используются диаметры трубопроводов в диапазоне 57...426 мм. Как правило, проектные организации используют только 7 типоразмеров диаметров из - 29, предусмотренных ГОСТ 10704-91. Использование уже 11 типоразмеров диаметров позволяет сократить массу сети на 3...4%.

*Осипов Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор УП «НИПТИС».*  
*Савастиенок А.Я. УО «ГАЗ-Институт».*