

Рис. 1. Результаты испытаний образцов серии СО-1, СК-1.

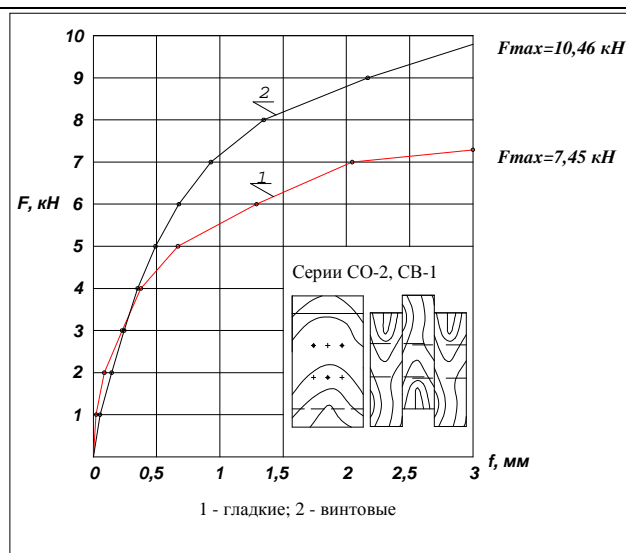


Рис. 2. Результаты испытаний образцов серии СО-2, СВ-1.

Следовательно, при проектировании соединений древесины с древесиной на профилированных гвоздях, число их можно уменьшить в среднем в 1,5 раза.

Заметим, что на первых этапах нагружения деформативность соединений на профилированных гвоздях выше, чем у соединений на обычных гвоздях. Очевидно, это связано с тем, что в процессе забивки обычных проволочных гвоздей волокна древесины уплотняются в зоне контакта с гладкой поверхностью стержня, а профилированные гвозди образуют рыхлую структуру древесины – часть волокон древесины перерезается кольцевой и винтовой резьбой гвоздя.

При дальнейшем увеличении нагрузки соединения на профилированных гвоздях становятся менее деформативными по сравнению с образцами на обычных проволочных гвоздях. Так, например, при нагрузке 6 кН деформативность соединений на винтовых гвоздях меньше в 1,9 раза, на кольцевых гвоздях – в 2,1 раза, что можно объяснить повышенной величиной трения в гнезде профилированных гвоздей и эффектом заклинивания кольцевой и винтовой резьбы в древесине.

ВЫВОДЫ

Профилированные гвозди могут весьма эффективно использоваться в соединениях деревянных конструкций. В отличие от соединений на обычных проволочных гвоздях, соединения на гвоздях с кольцевой и винтовой резьбой обладают большей несущей способностью и сравнительно меньшей деформативностью в тех случаях, когда несущая способность соединений определяется работой связей на изгиб.

Следует продолжить работы по исследованию соединений на профилированных гвоздях с целью установления влияния диаметра гвоздей, соотношения размеров соединяемых деревянных элементов и других факторов на несущую способность соединений как при кратковременном, так и при длительном воздействии нагрузки.

УДК 666.972

Филимонова Н.В.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К МОДЕЛИРОВАНИЮ МИКРОСТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ НА ОСНОВЕ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ ЦЕМЕНТА

Перспективным направлением в развитии современных конструктивных строительных материалов является разра-

ботка и получение цементных бетонов, обладающих комплексом высоких экономических, технологических, проч-

Филимонова Наталья Викторовна, ассистент каф. технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проспект фирмы Вольф. Металлические плиты с гвоздевыми соединениями.
2. Технические условия. Фермы цельнодеревянные с креплениями на металлических пластинах с зубьями-дюбелями (временные) /ЗалсибНИПИагропром. – Новосибирск: НИСИ, 1986. – 31с.
3. INFORMATIONSDIENST HOLZ. HOLZBAU HANDBUCH. REINE 4. TEIL 4. FOLDE 2.
4. Справочное руководство по древесине / Лаборатория лесных продуктов США; Пер. с англ. Я.П. Горелика и Т.В. Михайловой; Под ред. С.Н. Горшина, А.Н. Кириллова, В.Е. Кузнецова, И.С. Мелехова, Л.Г. Плоткина, Б.Н. Уголева, А.С. Фрейдина, И.К. Шмурова. – М.: Лесн. пром-ть, 1979. – 544с.
5. Отделочный мужчина// Изобретатель и рационализатор. 1996, №3, с10.
6. СНиП II - 25 – 80. Деревянные конструкции. Нормы проектирования / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1983. – 31с.
7. СНБ 5.05.01 – 2000. Деревянные конструкции. – Мн.: Минстройархитектуры, 2001. – 70с.
8. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1980. – 40с.
9. Государственный стандарт Республики Беларусь. Конструкции деревянные. Метод определения прочности и деформативности соединений (проект).
10. Дмитриев П.А., Смирняков Ю.Д., Пуртов В.В. Исследование соединений деревянных элементов на дюбелях при действии кратковременных нагрузок // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1988. - №2. – С. 16-21.

ностных и эксплуатационных характеристик. Такие бетоны получили название высококачественных. Технология их изготовления, как правило, предусматривает применение микронаполнителей и суперпластификаторов при минимальном возможном водоцементном (или водовязущем) отношении и повышенном расходе цемента. С одной стороны эти технологические приемы позволяют эффективно модифицировать структуру, повышая плотность и однородность бетона. С другой – усугубляют ряд его серьезных недостатков. В частности, как показали исследования, высококачественным бетонам, имеющим низкое водоцементное отношение, свойственны повышенные величины деформаций усадки.

Следует отметить, что усадочные явления сопровождают процесс твердения практически всех цементных систем. К началу XXI века эта проблема, даже будучи достаточно изученной на эмпирическом уровне, не потеряла своей актуальности. Исследования, проводимые в этой области, позволили выявить несколько различных видов и механизмов усадочных процессов. Все они могут быть свойственны любой цементной системе, и проявляются с разной интенсивностью в зависимости от состава бетонной смеси, возраста структуры, многообразия внешних и внутрискруктурных факторов.

Эффективным практическим решением проблемы усадки является применение расширяющихся цементов. Наибольшее распространение среди них получили минеральные вяжущие вещества на основе сульфаталюминатных композиций, позволяющих реализовать механизм так называемого «твердофазового» расширения с образованием сложной соли – трисульфогидроалюмината кальция, природным аналогом которой является минерал «эттрингит». Деформации свободного линейного расширения, свойственные такой системе, компенсируют либо намного превосходят суммарные усадочные деформации, развивающиеся как на стадии твердения вяжущего, так и в процессе эксплуатации. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что используемый в практике применительно к таким вяжущим термин «безусадочный цемент» довольно спорен. Как уже отмечалось, практически все клинкерные вяжущие вещества в процессе гидратации претерпевают тот или иной вид усадки. Параллельно усадке в такой системе развиваются процессы расширения. В зависимости от того, какой вид деформации, – усадка или расширение, – превалирует, объем системы изменяется в соответствующем направлении, либо остается постоянным (деформация усадки равна деформации расширения). По мнению некоторых авторов эти деформации подчиняются принципу суперпозиций, и их общий вклад в изменение объема системы можно определить элементарным сложением.

Наличие в материале разнозначных деформаций, тесно связанных с химическими процессами и капиллярными явлениями, неблагоприятно влияет на внутреннее состояние микроструктуры, поскольку способствует накоплению собственных напряжений вплоть до микроразрушения цементного камня. При этом изменяется не только химико-минералогический состав структуры, но и ее геометрия. В результате химических реакций непрерывно обновляется состав твердой и жидкой фаз, а параллельное развитие процессов усадки и расширения приводит к модификации структуры порового пространства и кристаллического каркаса вследствие циклического саморазрушения и восстановления структуры. Увеличение общего объема пор, пустот и трещин при расширении может ослаблять действие усадки, вызванной физическими (поверхностными и капиллярными) явлениями. В свою очередь усадка, как химическая, так и физическая (включающая аутогенную на участках с ненарушенной капиллярной пористостью и воздушную), уменьшает внешние деформации расширения. Описанные явления приводят к потере стабильности свойств материала. В нем могут возникать

спад прочности, интенсивный рост и резкое снижение свободных и связанных деформаций расширения. При таких обстоятельствах сложно спрогнозировать величину самонапряжения бетона на основе напрягающего цемента, а поведение материала под действием внешней нагрузки может стать непредсказуемым. Отсутствие гарантированной величины самонапряжения ставит под сомнение и рациональные основы проектирования самонапряженных конструкций, где указанный параметр применяется в качестве базовой переменной.

В сложившейся ситуации необходимо разработать научно-обоснованный метод прогнозирования базовых характеристик напрягающего бетона: самонапряжения и свободного линейного расширения. Учитывая сложность процессов, развивающихся в гидратирующей расширяющейся системе, задачу целесообразно решать с применением структурно-механического моделирования. На фоне существующих феноменологических подходов преимущества этого способа становятся особенно выразительными при анализе собственных напряжений, которые возникают в бетоне на стадии структурообразования еще до приложения внешней нагрузки, и о которых невозможно судить по внешним проявлениям (по величине зафиксированных деформаций) [9].

Поскольку напрягающий бетон является композитным материалом, в котором расширение в большей степени обусловлено собственными деформациями цементной матрицы, необходимо для начала представить картину структурообразования цементного камня. При этом следует учитывать специфику химических превращений, наличие собственных деформаций расширения и усадки, а также принимать во внимание накопление внутрискруктурных напряжений, их перераспределение и релаксацию вследствие микротрещинообразования и самовосстановления структуры.

В наибольшей степени таким предпосылкам удовлетворяет комплексный подход [1], согласно которому при оценке собственных напряжений следует рассматривать в неразрывной связи химическую, геометрическую и механическую стороны процесса расширения. Каждая из них в настоящее время представляет собой практически отдельную сферу исследования, поэтому известные результаты зачастую не только разрозненны, но и противоречивы. Необходимо упорядочить и структурировать имеющиеся опытные данные и научные представления о расширяющихся композициях, превратив их в единую комплексную систему. С этой целью предпримем попытку построения одного из множества возможных вариантов структурно-механической модели расширяющегося цементного камня исходя из наиболее популярных на сегодняшний день представлений.

Несомненно, проводя такой эксперимент очень важно учесть максимально возможное количество известных фактов, оказывающих влияние на формирование расширяющейся микроструктуры. Тем не менее, в рамках настоящей статьи представлены лишь общие, наиболее существенные, на наш взгляд, положения по моделированию.

Для начала на базе существующих представлений сформируем базовую концепцию формирования структуры цементного камня, то есть, определим основной конструктивный принцип структурообразования, который в дальнейшем позволит перейти к схематическому представлению моделируемой системы.

Напрягающий цемент представляет собой многокомпонентное вяжущее вещество. Механизм его расширения находится в строгом соответствии с количественным соотношением между силикатами, алюминатами, сульфатами и свободной известью, поэтому рассмотрим некоторые особенности взаимодействия и совместной кристаллизации этих четырех фаз.

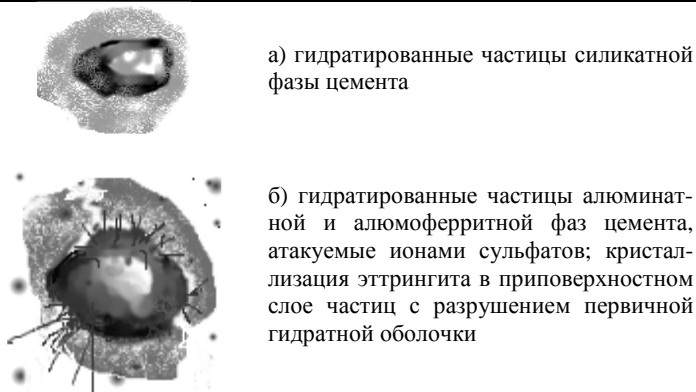


Рис. 1. Узловые элементы силикатного и алюминатного каркасов цементного камня

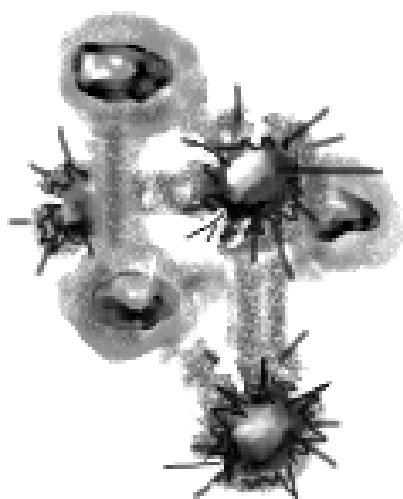


Рис. 3. Схематическое изображение кристаллической структуры цементного камня на основе напрягающего цемента высокой энергоактивности. Рост «активного» алюминатного каркаса, вызванный кристаллизацией этtringита.

Примечание. Фрагменты каркасов, для наглядности, изображены утрировано свободно. В реальной структуре узловые элементы каркасов, – гидратированные частицы цемента, – тесно соприкасаются друг с другом так, что расширение алюминатного каркаса, передаваясь связям силикатной составляющей, вызывает в них растягивающие напряжения. При этом сам алюминатный каркас оказывается сжатым.

При сближении и сращивании отдельных кристаллогидратов в единый кристаллический каркас образование так называемых кристаллизационных контактов сращения возможно только между кристаллами с подобной кристаллохимической структурой. Таковыми являются кристаллические решетки гидроалюминатов и гидроферритов [7], которые вместе с этtringитом и образуют первичный кристаллический каркас цементного камня (явление, обусловлено высоким содержанием алюминатов, что характерно для напрягающих цементов высокой энергоактивности). При этом свободному растворению алюминатов препятствует пересыщение жидкой фазы по CaO и образование на их поверхности первичных пленок этtringита. Дальнейшая гидратация алюминатов осуществляется путем диффузии свободных сульфат-ионов сквозь изолирующие слои этtringита, причем при сохранении в поровом растворе высокой концентрации ионов Ca^{2+} диффузионные процессы протекают в одном направлении и не сопровождаются отводом продуктов реакции в поровое пространство матрицы. В поверхность раздела между кристаллическими сростками каркаса и гидратирующейся частицей цемента «врастают» новые структурные единицы (кристаллы этtringита, гидроалюминаты и т.д.), рис.1б. Первичные пленки этtringита разрушаются, однако кристаллизационные контакты сращения (связи) между частицами цемента сохраняются. Объем каркаса увеличивается с соблюдением условия локализованного расширения твердой фазы, при этом целостность каркаса не нарушается, а пористость

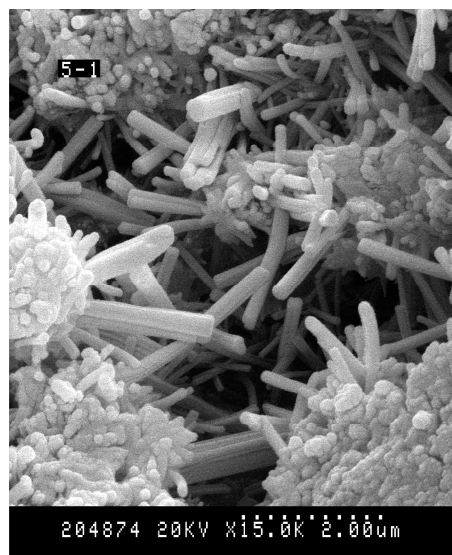


Рис. 2. Микрофотография структуры цементного камня на основе напрягающего цемента

структуры существенно увеличивается даже при незначительном приращении объема твердых фаз, рис.3.

Экспериментальные зависимости между приращением объема структуры и приращением объема твердых фаз, полученные в работах [1,10,11], показали, что процессам расширения различных напрягающих цементов свойственна общая закономерность. Деформации развиваются в три этапа, каждому из которых соответствует характерный участок структурных кривых (рис. 4).

С течением времени в гелевой составляющей $C-S-H$ также образуются кристаллизационные контакты сращения: силикатная фаза набирает прочность. Однако для напрягающего цемента упругие характеристики этой структурной составляющей не должны представлять интереса до тех пор, пока растущее число контактов сращения не приведет к образованию единого силикатного каркаса, способного оказывать ограничение деформациям первичного сульфоалюминатного каркаса. С этого момента в структуре начнется механическое взаимодействие двух сплетенных каркасов, – активного и пассивного, – которые, вследствие отсутствия между ними химического сродства и схожести кристаллических решеток, существуют относительно автономно (рис.3). При этом один из них (активный) сжат, другой (пассивный) – растянут.

В соответствии с предложенной схемой структурообразования общая деформация микроструктуры будет зависеть от величины деформации алюминатного каркаса и прочности силикатного каркаса на растяжение.

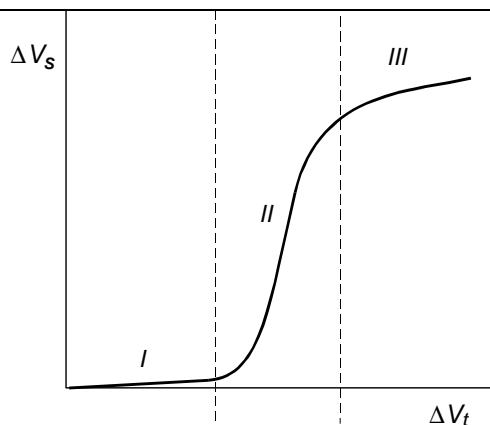


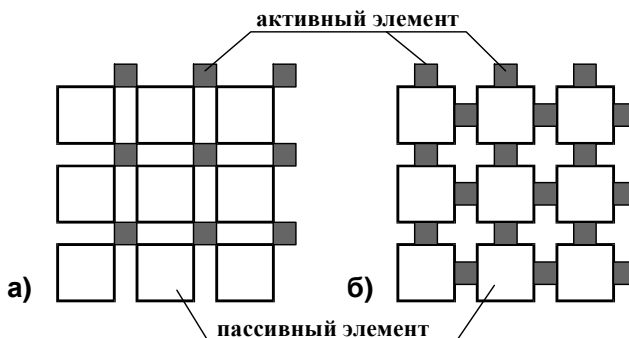
Рис. 4. Изменение объема структуры (ΔV_s) напрягающего цемента в зависимости от изменения объема твердых фаз (ΔV_t) [10]

Участок I Начальная стадия структурообразования. Увеличение объема твердых фаз ΔV_t не приводит к изменению объема структуры ΔV_s

Участок II Период интенсивного расширения. Относительно небольшое приращение объема твердых фаз вызывает сильное увеличение общего объема структуры. Наблюдается разрыхление структуры и падение прочности. Расширение сопровождается значительным увеличением пористости, то есть прирост объема структуры соизмерим с приростом объема пор ($\Delta V_s \approx \Delta V_p$) и заканчивается обычно с окончанием реакции гидратации расширяющегося компонента.

Участок III Период восстановления нарушенных контактов, уплотнения структуры, увеличения ее механической прочности. Объем твердых фаз увеличивается преимущественно за счет гидратации силикатных минералов. Расширение структуры отсутствует.

Рис. 5. Геометрические модели двухкомпонентных структур с угловым (а) и гранецентрированным (б) расположением активного элемента [8].



Алюминатный каркас, в свою очередь, также может быть представлен в виде двухкомпонентной системы, имеющей в своем составе элементы двух типов:

1. пассивные, не изменяющие своего первоначального объема (негидратированные частицы цемента, кристаллогидраты);
2. активные, претерпевающие определенную объемную деформацию (этtringит).

Для изучения собственных деформаций таких систем в работе [8] предложены геометрические модели, представленные на рис.5. Их несложная математическая обработка позволяет определять величину деформации структуры в зависимости от размеров составляющих ее элементов и приращения объема активного компонента.

Геометрическая интерпретация рассматриваемой нами модели активного алюминатного каркаса будет выглядеть аналогично (см. табл.1). Расчетные геометрические параметры элементов каркаса следует определять исходя из концентрации и дисперсности алюминатной фазы, а также объема соединений, образующихся в процессе гидратации (этtringита и пассивных кристаллических сростков). В качестве примера приведем решение поставленной задачи, несколько упростив ее условия.

Во-первых, будем считать, что при затворении цемента водой частицы алюминатной и алюмоферритной фаз распределяются в системе равномерно и регулярно, то есть находятся на равных расстояниях l друг от друга и имеют кубическую объемную упаковку. Во-вторых, все частицы моноразмерны, имеют одинаковую форму (куб или шар). В качестве характерного размера сферической частицы примем средний диаметр d , рассчитанный исходя из удельной поверхности вяжущего

$$d = \frac{6}{S_{y\phi} \cdot \rho}, \quad (1)$$

где $S_{y\phi}$ – удельная площадь поверхности цемента, $см^2/г$;

ρ – истинная плотность частиц цемента, $г/см^3$

Определим расстояние l между частицами алюминатов в цементе (см. табл.2).

Для некоторого единичного объема ($V=1$), в котором частицы распределены в соответствии с принятой кубической упаковкой справедливо выражение

$$V = l^3 \cdot n = 1, \quad (2)$$

где l – расстояние между частицами,
 n – количество частиц.

Для сферических частиц
$$n = \frac{k \cdot V}{\pi \cdot d^3 / 6}, \quad (3)$$

где k – объемная концентрация частиц алюминатной фазы в долях единицы.

Подставив (3) в (2) и выражая l , получим

$$l = \frac{1}{\sqrt[3]{n}} = \frac{0.8 \cdot d}{\sqrt[3]{k}} \quad (4)$$

Если к единичному абсолютному (без пор и пустот) объему цемента ($V=1$) добавить некоторый объем воды V_g , общий объем системы будет равен

$$V' = V + V_g, \quad (5)$$

Объем, занимаемый водой V_g , выразим через B/C , тогда равенство (5) примет вид

$$V' = 1 + \rho \cdot B/C, \quad (6)$$

где ρ – истинная плотность цемента, $г/см^3$

Теперь V' будем считать элементарным объемом, в котором

$$k' = k \cdot \frac{V}{V'} = k \cdot \frac{1}{1 + \rho \cdot B/C}, \quad (7)$$

где k – объемная концентрация частиц алюминатной фазы в сухом цементе,

k' – то же в цементном тесте.

Подставляя k' по ф.(7) в выражение (4), получим:

$$l = \frac{0.8d}{\sqrt[3]{k'}} = 0.8d \cdot \sqrt[3]{\frac{1 + \rho \cdot B/\Pi}{k}} \quad (8)$$

Формула (8) представляет собой аналитическую зависимость параметра l , через который может быть косвенно охарактеризована и начальная пустотность активного каркаса, от основных технологических факторов:

- тонкости помола цемента (d),
- водоцементного отношения (B/Π),
- концентрации расширяющейся добавки в цементе (k).

Появление кристаллических контактов срастания между оболочками частиц произойдет тогда, когда объем продуктов гидратации алюминатной фазы цемента составит не менее

$$V_{\text{САИ,}}^{\text{этмп}} = c \cdot V - k'_1 - k'_2 - p \cdot (1 - k'_2) \quad (9)$$

где c – коэффициент, учитывающий химическую усадку,

V – начальный единичный объем системы, $V=1$

k'_1 – объемная концентрация частиц алюминатной фазы в цементном тесте,

k'_2 – объемная концентрация частиц силикатной фазы в цементном тесте,

p – пустотность системы; при принятой кубической упаковке частиц $p=0.476$

Выполним ориентировочную проверку полученных зависимостей, применив в расчетах характеристики реального материала. Возьмем напрягающий цемент, содержащий в своем составе 18% расширяющейся добавки.

Будем считать, что истинная плотность цемента $\rho=3,15$ г/см³; $B/\Pi = 0.28$; $S_{y0}=4500$ см²/г; $k_1=0.18$, $k_2=0.82$.

Переходя от k_1, k_2 к объемным концентрациям компонентов в цементном тесте, получим:

$$k'_1 = \frac{0.18}{0.18 + 0.82 + 0.28 \cdot 3.15} = 0.10;$$

$$k'_2 = \frac{0.82}{0.18 + 0.82 + 0.28 \cdot 3.15} = 0.44.$$

Средний диаметр частиц

$$d = \frac{6}{S_{y0} \cdot \rho} = \frac{6}{4500 \cdot 3.15} = 4.23 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 4.23 \mu\text{м}.$$

Расстояние между центрами частиц

$$l = \frac{0.8d}{\sqrt[3]{k'_1}} = \frac{0.8 \cdot 4.23}{\sqrt[3]{0.1}} = 7.29 \mu\text{м}.$$

Относительный объем новообразований, не вызывающий расширение

$$V_{\text{САИ,}}^{\text{этмп}} = c \cdot V - k'_1 - k'_2 - p \cdot (1 - k'_2) = \text{или } \approx 15\% \\ = 0.95 - 0.1 - 0.44 - 0.476 \cdot (1 - 0.44) = 0.146$$

Известно, что в первые часы гидратации напрягающего цемента основной кристаллизующейся фазой является эттрингит. Лабораторные испытания напрягающего цемента, характеристики которого приняты в настоящем расчете, показали, что при $B/\Pi=0.28$ количество образовавшегося в нем за первые сутки эттрингита находится в пределах (14..19)% и не вызывает существенного расширения структуры.

Максимальной величине собственных деформаций соответствует дальнейшее увеличение количества эттрингита на 5..7%. Принимая во внимание то, что экспериментально определенные численные значения описывают суммарное содержание как активного приповерхностного эттрингита, так и пассивного, кристаллизующегося в поровом пространстве (вне структуры) и не приводящего к расширению, а также учитывая принятые в расчетной схеме упрощения, можно судить о достаточном для приближенных вычислений согласовании полученного результата с экспериментальными данными. На рис.6 приведены экспериментальные зависимости (согласно [11]), дополнительно подтверждающие справедливость суждений, состоящих в основе проведенных расчетов.

Определив геометрические размеры активного каркаса можно рассчитать его относительную деформацию ϵ_{AK} при известном изменении объема твердых фаз ΔV_r . В нашем случае дополнительная кристаллизация эттрингита в количестве $\Delta V_{t(\text{этмп})}=7\%$ вызовет приращение линейного размера l (выраженное как толщина пленки эттрингита на поверхности частиц), равное

$$\Delta l = \Delta d = \frac{\Delta V_{t(\text{этмп})}}{S_{y0}^v} = \frac{0.07}{1418} = 0.49 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 0.49 \mu\text{м},$$

где S_{y0}^v – площадь поверхности частиц алюминатной фазы, в единице объема цементного камня, см²/см³.

$$S_{y0}^v = S_{y0} \cdot \rho \cdot k'_1 = 4500 \cdot 3.15 \cdot 0.1 = 1418 \text{ см}^2/\text{см}^3.$$

Относительное линейное расширение активного каркаса:

$$\epsilon_{AK} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{0.49}{7.29} = 0.0672 = 6.72\%.$$

В условиях несформировавшегося силикатного каркаса внешняя деформация свободного линейного расширения цементного камня была бы равна ϵ_{AK} . Но поскольку параллельно в системе развиваются процессы кристаллизации силикатной фазы, оказывающей ограничение свободным деформациям активного каркаса, к комплексу химических и геометрических явлений следует подключить рассмотрение механической модели структуры (табл. 1). В ее основу может быть взята идеализированная модель, предложенная в работе [9] для иллюстрации особенностей развития самонапряжения в расширяющейся системе в условиях внешнего ограничения.

Модель включает активный элемент, изменяющий свои линейные размеры, и несколько пассивных элементов с различными жесткостями. В качестве основных расчетных характеристик элементов модели следует принимать:

- относительную деформацию расширения активного элемента ϵ_{AK} , определяемую на основе анализа геометрических параметров структуры,
- прочность на растяжение элементов и связей пассивного каркаса,
- жесткости всех элементов системы C_i .

При оценке прочности пассивного каркаса необходимо учитывать степень гидратации силикатной фазы клинкера, которая будет определять энергию отдельных химических связей каркаса. Когда работа, производимая при расширении активного каркаса, превысит энергию химических связей в силикатной фазе, пассивный каркас разрушится. При этом условие прочности будет иметь вид

$$G = \sigma_{\text{разр}} \cdot \Delta V, \quad (11)$$

где G – общая энергия химических связей в пассивном каркасе, МДж;

$\sigma_{\text{разр}}$ – разрушающие растягивающие напряжения, МПа;

ΔV – приращение объема активного элемента, м³.

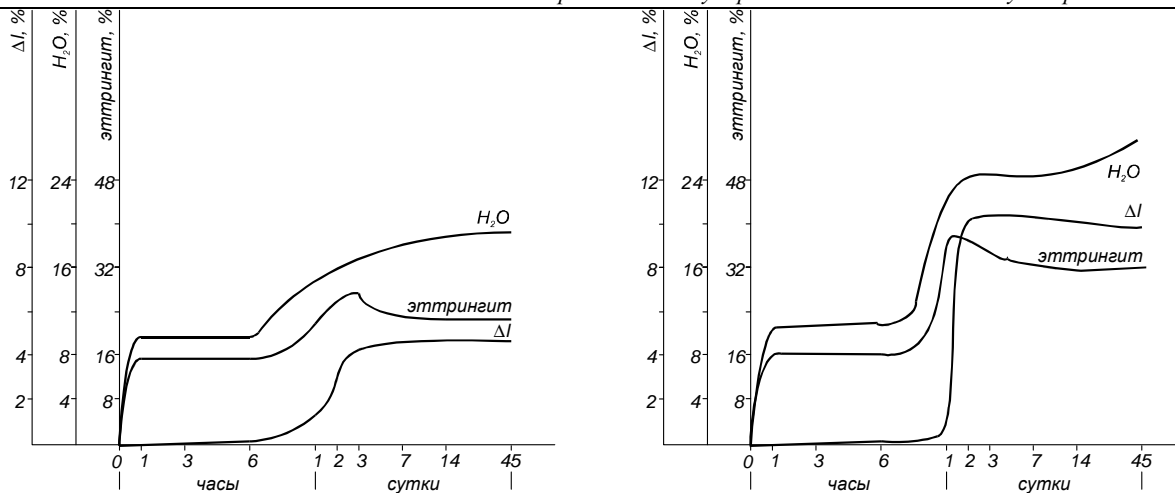


Рис. 6. Кинетика кристаллизации этtringита, связывания воды и развития деформаций расширения при твердении различных напрягающих цементов [11]

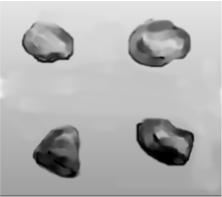
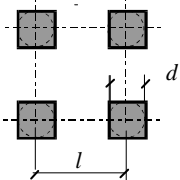
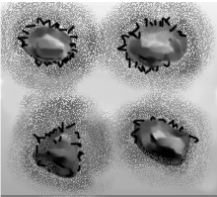
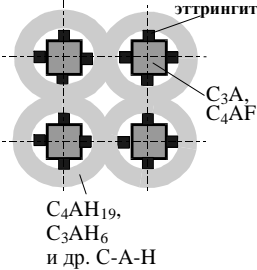
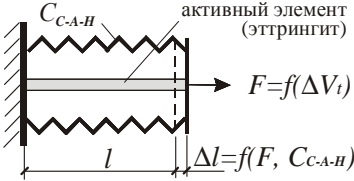
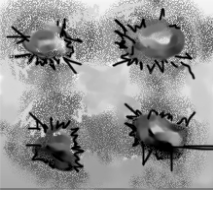
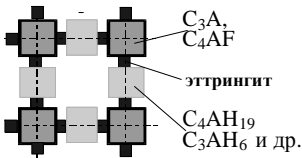
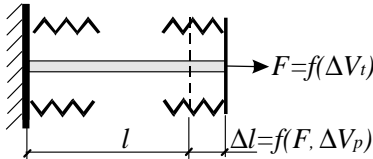
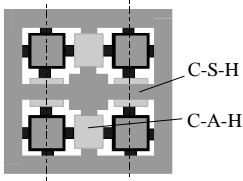
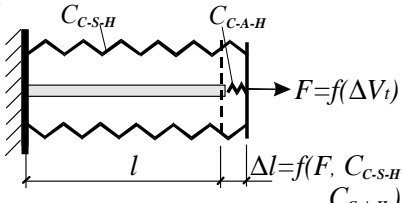
Таблица 1. Реализация комплексного подхода при моделировании структуры

Химические преобразования						
<p>Источником деформирования напрягающего цемента являются объемные изменения, происходящие в процессе взаимодействия клинкерных минералов с гипсом и водой, поэтому расчет деформаций и напряжений базируется на балансе объемов исходных минералов и новообразований пассивной и активной фаз.</p> <p>Приведенная диаграмма схематически отражает характер фазовых переходов и позволяет отслеживать изменения, вносимые непрерывно протекающим химическим взаимодействием компонентов цементного камня</p>						
	пассивная фаза цемента		активная фаза цемента			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	гипс	объемная концентрация минералов в исходном цементе
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	
0	k'_1	k'_2	k'_3	k'_4	k'_5	объемная концентрация минералов в цементном тесте
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	гипс вода	
	CH C-S-H		CH C_3AH_6 C_4AH_13 этtringит			
время ↓	приращение объема твердых фаз ΔV_f			химическая усадка		

При реализации энергетического подхода в расчете механической модели следует принимать во внимание, что прочность на растяжение силикатного каркаса, сложенного из кристаллов *C-S-H*, определяется энергией и количеством связей *O-Ca-O*, а также относительной влажностью в порах, при

которой ионами Ca^{2+} может быть адсорбировано определенное число молекул воды [1]. Согласно правилу Полинга электростатическая прочность связи катиона (*E*) с каждым из окружающих его анионов обратно пропорциональна координационному числу катиона:

Таблица 2. Расчет деформаций расширения напрягающего цемента

Реальная структура	Геометрия структуры и собственных деформаций	Механизм взаимодействия элементов структуры
 <p>При затворении водой частицы алюминатной фазы цемента распределяются в системе равномерно на некотором расстоянии друг от друга</p>		<p>Порядок расчета свободных и связанных деформаций цементного камня должен быть таким:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. По диаграмме химических преобразований системы определяются приращения объемов активных и пассивных твердых фаз ΔV_t 2. По геометрической модели определяется свободная деформация активного каркаса (энергетический потенциал вяжущего) $\epsilon_{AK} = \Delta l/l$ 3. Рассчитывается механическая модель, соответствующая рассматриваемому моменту времени, и определяется связанная деформация активного каркаса, эквивалентная общему линейному расширению системы.
 <p>Когда гидратные оболочки на частицах срастаются, образуется активный каркас</p>		 <p>Жесткость гидратных оболочек C_{C-A-H} является фактором, ограничивающим свободные деформации Δl активного каркаса. Это – 1-й участок структурных кривых (см. рис.4), на котором прирост объема твердых фаз ΔV_t способствует незначительному приращению объема структуры.</p>
 <p>По мере роста объема этtringита оболочки разрушаются:</p>		 <p>2-й участок структурных кривых $\Delta V_s \gg \Delta V_t$, $\Delta V_s \approx \Delta V_p$</p>
<p>Затем в поровом пространстве активного каркаса кристаллизуется фаза C-S-H</p>		<p>Взаимодействие элементов активного и пассивного каркасов</p>  <p>3-й участок структурных кривых</p>

$$E = \frac{ve}{K}, \quad (12)$$

где v – валентность катиона,

e – заряд электрона,

K – координационное число.

Таким образом, чем больше координационное число K , то есть, чем большее число молекул воды адсорбировано катионами Ca^{2+} (может быть до 7 в зависимости от влажности среды), тем слабее связь $O-Ca-O$ и, следовательно, тем меньше прочность кристаллических сростков $C-S-H$. Этим, отчасти, может быть обусловлен факт наиболее интенсивного расширения при твердении материала в водных условиях.

Несмотря на предельную идеализацию структурно-механической модели цементного камня, представленной в табл.1, осуществить на ее основе реальную оценку напряженно-деформированного состояния структуры довольно сложно. В первую очередь это связано с назначением исходных рас-

четных характеристик. Сложность состоит в определении степени гидратации отдельных минералов в заданный момент времени, а именно – в построении диаграммы, адекватно отражающей все объемные изменения и фазовые переходы, происходящие в процессе твердения.

В настоящее время подобные задачи успешно решаются с применением методов компьютерного моделирования [2].

Современные компьютерные модели позволяют симулировать процесс гидратации цемента с учетом его гранулометрии, химико-минералогического состава, В/Ц и других технологических факторов, оперируя известными закономерностями процессов диффузии, растворения и химических реакций. Располагая перечисленными исходными данными можно в любой момент времени определять объемные изменения твердой и жидкой фаз в соответствии с кинетикой и стехиометрией реакций гидратации. Алгоритм компьютерного моделирования процесса гидратации портландцемента, принятый в работах [2,6], представлен на рис. 7.

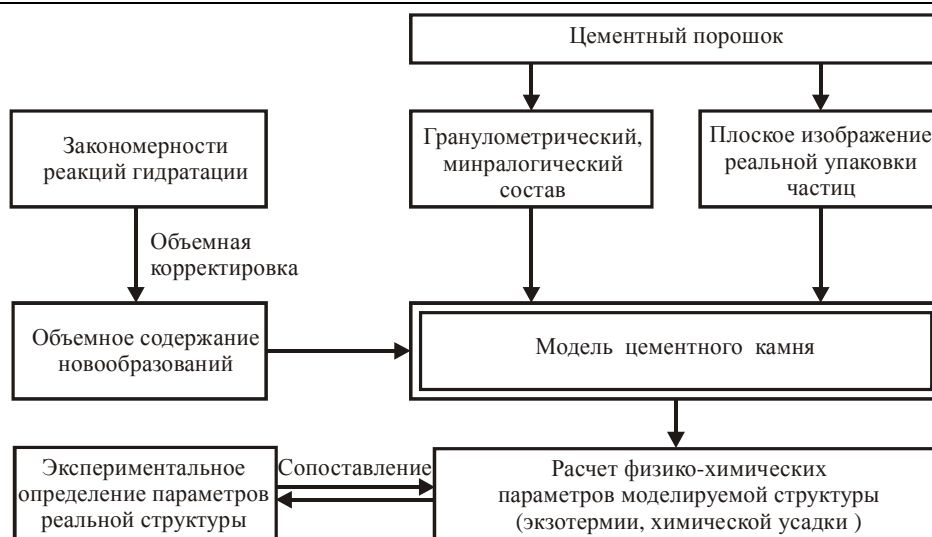


Рис. 7. Блок-схема построения компьютерной модели для описания процесса гидратации портландцемента [2].

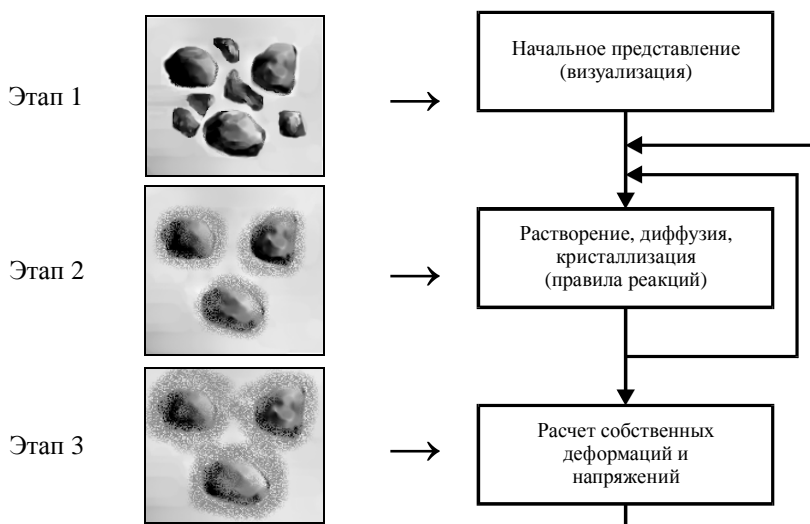


Рис. 8. Стадии структурообразования, соответствующие им этапы моделирования и алгоритм программы формирования микро-структуры расширяющегося цементного камня.

Гидратация напрягающего цемента сопровождается значительным расширением, поэтому в общем виде программа будет соответствовать представленной на рис.8.

Программой предусмотрено циклическое выполнение отдельных операций в соответствии с правилами кристаллизации и деформирования структуры цементного камня. Операции, моделирующие процессы растворения, диффузии и кристаллизации последовательно повторяются до тех пор, пока не наступит момент схватывания цементного теста. Дальнейшая кристаллизация будет приводить к деформированию и, возможно, разрушению сформировавшегося начального кристаллического каркаса. С этого момента цикл формирования структуры следует дополнить операциями расчета деформаций и напряжений.

На первом этапе построения модели необходимо определить характер распределения частиц цемента в воде и получить их начальное изображение. Простое решение этой задачи может быть получено при принятии следующих допущений:

- частицы цемента имеют форму шара;
- распределение частиц в системе является случайным и не зависит от сил физического взаимодействия;

- все частицы обводнены и не соприкасаются друг с другом.

Далее с учетом гранулометрического состава частицы цемента распределяются в заданном объеме случайным образом, начиная с самых крупных. Для этого центру каждой частицы назначаются определенные координаты, которые генерируются как случайные числа при условии, что на плоском изображении частицы не накладываются.

Затем в соответствии с минералогическим составом каждой частице присваивается определенный цвет. Так, для системы, содержащей минералы C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF , гипс и воду, получим шестичетное цифровое изображение.

Более точные технологии получения начального изображения предусматривают цифровую обработку микрофотографий, снятых при помощи сканирующего электронного микроскопа со специально подготовленных шлифов, рис.9 [2]. После считывания информации с микрофотографии генерируется растровое изображение, под которым понимается двумерная матрица, состоящая из большого числа элементов – пикселей (pixel – от англ. picture element), каждый из которых обладает определенным цветом. Разрешение и размер изображения подбираются таким образом, чтобы 1рiх соот-

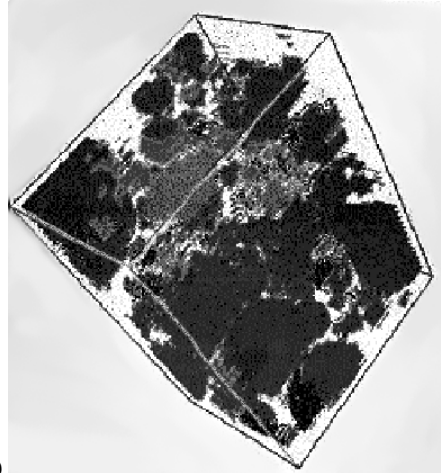
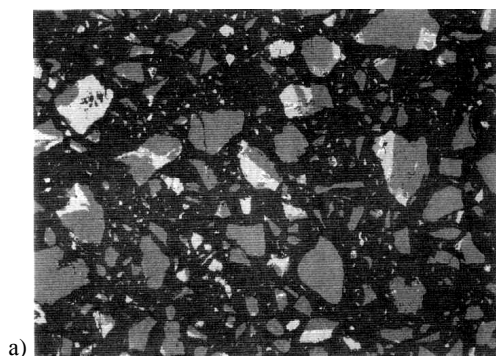


Рис. 9 а) плоское изображение реальной упаковки цементных частиц; б) объемная модель структуры цементного камня [2].

ветствовал 1µм длины реальной картинки. Согласно [2] изображение размером 100x100 µм (pix) можно считать вполне репрезентативным. Для идентификации частиц по их минералогическим характеристикам определяется соответствие цвета пикселей определенным минералам цемента. Полученное плоское цифровое изображение может быть преобразовано в трехмерное.

На втором этапе осуществляется моделирование процесса структурообразования гидратирующего цемента. Гидратация цемента может быть представлена в виде трех составных частей процесса:

- материал растворяется с поверхности отдельных цементных частиц (реакция поверхностного растворения);
- диффундирует внутри свободного (доступного) порового пространства;
- реагирует с водой и другими растворенными или твердыми частицами, формируя гидратные продукты.

При моделировании микроструктуры гидратирующего цемента необходимо симулировать процессы растворения, диффузии и реакции гидратации. Каждый из этих процессов может имитироваться с использованием правил клеточного построения – *cellular-automaton rules* (CA), которые позволяют манипулировать пикселями начального изображения, создавая аналог развивающейся структуры цементного камня. При этом пиксели, наделенные свойствами основных минералов цемента, могут перемещаться и взаимодействовать друг с другом в соответствии со стехиометрией и кинетикой химических реакций, протекающих в моделируемой цементной системе.

На третьем этапе моделирования формирующейся структуры в первую очередь необходимо определить момент начала схватывания цементного теста, то есть момент перехода вязкопластичной коагуляционной структуры в единый кристаллический сросток. Для решения этой задачи целесообразно применять так называемую перколяционную теорию [6].

Главной концепцией теории перколяции является идея связности (неразрывности). Порог перколяции определяется относительным объемом структуры в занимаемом пространстве, при котором приобретает либо теряется ее неразрывность. В частности, при исследовании модели, представляющей собой матрицу со случайным образом расположенными в ней сферическими включениями [3], установлено, что объемное содержание последних в количестве ~29%, соответствует их переходу в состояние континуума, что является примером перколяции в беспорядочно формирующейся структуре.

Непосредственно после смешивания цемента с водой твердые фазы представляются полностью разрывными. Их возможное взаимодействие может быть обусловлено только ван-дер-ваальсовыми силами [5], поэтому свежеприготовлен-

ная цементная паста представляет собой вязкую жидкость. Постепенно твердые фазы срастаются посредством образующихся и объединяющихся случайным образом поверхностных продуктов реакций и в некоторый момент времени образуют континуум. Экспериментально этот момент может быть установлен при использовании пенетрометра (прибора Вика). Согласно перколяционной теории точка схватывания определяется как точка, в которой происходит перколяция всей твердой фазы. Эта точка может быть рассчитана с помощью компьютерной модели как степень гидратации при формировании каркаса, состоящего из цементных частиц, соединенных гелевыми (а впоследствии кристаллическими) продуктами реакций. В работе [6] на упрощенной модели мономинерального вяжущего, состоящего из минерала C_3S , установлено, что перколяция твердой фазы происходит при степени гидратации 1.8%, 2.7% и 4.6% для $V/U = 0.3, 0.4$ и 0.5 соответственно.

Определив наиболее вероятный момент появления в структуре собственных напряжений, а также имея информацию об объемных изменениях продуктов реакции и характеристиках порового пространства, соответствующих этому моменту времени, можно переходить к расчету напряженно-деформированного состояния системы. При этом возможны различные варианты его реализации.

Одним из них может быть отстранение в определенный момент от получаемого изображения и переход к расчету по известным методикам с применением более простых структурно-механических моделей, элементы которых схематически отражают связи и взаимодействия компонентов структуры цементного камня, как это было показано выше. Напомним, такие модели могут состоять из блоков, упругих связей, активных вставок или пассивных включений, соединенных между собой в соответствии с представлениями о морфологии реальной структуры и наделенных установленными на данный момент физико-механическими характеристиками (жесткостью, прочностью и т.п.).

Более оптимальным, на наш взгляд, вариантом является дальнейшая обработка цифрового изображения с использованием упомянутых выше правил CA. Главные преимущества этого метода заключаются в визуальном представлении процессов, происходящих в твердеющем цементном камне. Это дает возможность непосредственно наблюдать за фазовыми превращениями и связанными с ними деформациями структуры. Кроме того, структура изображения, его разбиение на множество элементарных ячеек (пикселей), возможно, позволит осуществлять расчет внутрискруктурных напряжений методом конечных элементов. Решение этого и ряда других вопросов структурообразования систем на основе напрягающего цемента открывает широкие перспективы развития со-

временных технологий виртуальных бетонов, на основе которых могут быть разработаны новые методы прогнозирования свойств реального материала.

Технология получения высокоэффективных бетонов должна стать более точной, надежной и простой в конечной реализации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, Н.Н. Скоблинская. Физико-химия собственных деформаций цементного камня. – М.: Стройиздат.– 1980 – 256с.1
2. D.P. Bentz. Three-Dimensional Computer Simulation of Portland Cement Hydration and Microstructure Development, *J. Am. Ceram Soc.*, **80** [1] 3-21 (1997).
3. E.J. Garboczi, K.A. Snyder, J.F. Douglas and M.F. Thorpe, *Phys. Rev.* **E52**, 819 (1995)
4. J. Kertesz, *J. Phys. Lett.* **42**, L393 (1981); W.T. Elam, A.R.Kerstein, and J.J. Rehr, *Phys. Rev. Lett.* **52**, 1516 (1984); S.B. Lee and S. Torquato, *J. Chem. Phys.* **89**, 3258 (1988).
5. W.-G. Lei, "Rheological studies and percolation modeling of microstructure development of fresh cement paste", PhD Thesis (University of Illinois, Department of Materials Science and Engineering, 1995).
6. E.J. Garboczi and D.P. Bentz. Computer Simulation and Percolation Theory Applied to Concrete. NIST, 1999.
7. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979.– 344 с.
8. Красильников К.Г., Подвальный А.М., Сегалов А.Е. О собственных деформациях пористых тел// Коллоидный журнал.– 1974.– том.– №2.– С. 266-271.
9. Тур В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона. Брест: БПИ, 1998.– 244 с.
10. Красильников К.Г., Никитина Л.В. Природа объемных деформаций при твердении расширяющихся цементов// Физико-химические исследования цементного камня и бетона: Сб. тр./ Под ред. А.Е. Десова.– Москва: Стройиздат, 1972.– С. 4–20.
11. Никитина Л.В, Лапшина А.И., Красильников К.Г. Зависимость между условиями кристаллизации этtringита и развитием деформаций расширения при твердении сульфатосодержащих цементов// Физико-химические исследования цементного камня и бетона: Сб. тр./ Под ред. А.Е. Десова.– Москва: Стройиздат, 1972.– С. 4–20.

УДК 666.9

Блещик Н.П., Щербицкая Е.В.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ И ВЫДЕРЖИВАНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ ВЫСОТОЙ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ 300 мм

При разработке новых конструктивных систем многоэтажных зданий с высокими потребительскими качествами и минимальным ресурсопотреблением возникла необходимость в разработке нового конструктивного решения длинномерных (пролетом от 9 и более метров) многопустотных плит увеличенной высоты поперечного сечения (300 мм), предназначенных для применения в перекрытиях многоэтажных зданий стеновых и каркасных систем с широким шагом (более 6 метров). Наряду с решением этой задачи в процессе выполнения научно – исследовательских работ [1] определялись и малоэнергоёмкие режимы выдерживания изделий в камерах тепловой обработки с разработкой технологического регламента изготовления плит для летних и зимних условий производства.

Энергосберегающие режимы тепловлажностной обработки преднапряженных многопустотных плит необходимо было назначать исходя из условия получения требуемой прочности бетона (передаточной, отпускной, проектной) с учетом особенностей, связанных с наличием напрягаемой арматуры, и при соблюдении требований к качеству и долговечности изделий. При этом следовало стремиться к максимальному ускорению твердения бетона при минимально возможных затратах энергетических ресурсов.

Технологический процесс тепловой обработки бетона обычно состоит из четырех этапов: предварительное выдерживание перед термообработкой $\tau_{пр.в}$; подъем температуры от уровня окружающей среды (или смеси) до максимально заданной $\tau_н$; тепловая обработка при максимально заданной температуре (изотермический процесс) $\tau_{из}$ и остывание изде-

лий до распалубки $\tau_{осм}$.

Предварительное выдерживание изделий из жестких бетонных смесей перед пропариванием создает условия для применения более жестких режимов прогрева (причем следует учесть, что при немедленной распалубке изделий скорость подъема температуры не должна превышать 20⁰С/ч) [2]. Чем выше марка цемента и класс бетона, жесткость бетонной смеси, а также температура предварительного выдерживания, тем меньше оптимальная продолжительность этого этапа. Введение химических добавок – ускорителей твердения приводит к сокращению, а пластификаторов и суперпластификаторов, при уменьшении В/Ц и равной удобоукладываемости смеси не изменяет оптимальной длительности предварительного выдерживания [3].

С целью предотвращения возникновения трещин при тепловой обработке при изготовлении многопустотных плит в силовых формах предусматривают предварительное выдерживание не превышающее 1 часа [4].

При изготовлении изделий по агрегатно – поточной технологии арматуру натягивают на упоры силовой формы, которую подвергают тепловой обработке совместно с изделием. На стадии подъема температуры вследствие температурных деформаций поддона на свободных участках арматуры возникают дополнительные напряжения, способствующие вытягиванию арматуры из бетона. При наличии сцепления это нарушает анкеровку арматуры с бетоном, а в дальнейшем при передаче усилия обжатия на бетон приводит к образованию продольных трещин и увеличению зоны передачи напряжений. Дотяжка арматуры при наличии раннего сцепления вызывает и растяги-

Блещик Николай Павлович, д.т.н., профессор каф. технологии строительного производства Белорусского национального технического университета.

Щербицкая Е.В., ассистент каф. технологии строительного производства Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220027, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65.