

DRAGAN V.I., MORILOVA N.L. Design procedure of survivability of structural construction of system «BSTU»

The design procedure of survivability of metal structural designs of system "BSTU", based on calculation of elements outside of elastic work is developed up to loss of stability of the compressed cores and ruptures of the stretched cores and redistribution of efforts in system in process after design works of a construction.

Verification of settlement model of survivability of structural designs system "BSTU" by results of tests of a natural fragment which has allowed to establish the basic stages of survivability: 1 – work of a design within design loads, 2 – work of a design before occurrence of the first plastic hinges in elements, 3 – a stage of accumulation of damages to a design, 4 – a stage of dynamic damage of a design, 5 – a stage of destruction of a design.

Construction of the diagramme of deformation of various constructive forms of structural designs of system "BSTU" such as a dome of a covering of a building of NOK RB and a structural plate of a covering of a scene in Hojniki who give the chance to describe process of accumulation of damages of constructions and to define levels of a stock of bearing ability for their all stages design loading and after design loading.

УДК 691.322 + 004.94

Разумейчик В.С., Дереченник С.С.

ВЛИЯНИЕ МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯ НА ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Введение. Современная мировая тенденция производства цементных бетонов заключается в замене обычного портландцемента цементами с высоким содержанием порошкообразных микронаполнителей различного происхождения. Ее обоснование вытекает, в первую очередь, из эколого-экономических соображений и не вызывает сомнений для производителей цемента. Все объясняется очень просто: затвердевший цементный камень содержит до 50% не до конца гидратированных зерен цементного порошка, которые уже не выполняют функции вяжущего материала, а играют роль своеобразного наполнителя, – окруженные продуктами гидратации, они формируют в структуре цементного камня так называемый жесткий каркас, определяя тем самым прочность материала. Это означает потенциальную возможность простого замещения таких цементных зерен специальным порошкообразным микронаполнителем, гораздо более низким по стоимости. В последнее время активно изучается вопрос о том, какой процент цементного порошка можно таким образом сэкономить с сохранением основных свойств конечного материала, и какими характеристиками должен при этом обла-

дать микронаполнитель. В первую очередь это касается его фракционного состава для соответствия исходному гранулометрическому составу цементного порошка – основного структурного параметра, рациональный подбор которого позволяет получать затвердевшие цементы с улучшенными характеристиками.

Для потребителей цемента целесообразность вышеуказанного подхода не всегда однозначна – это связано со свойством наполнителя существенно изменять поведение бетонной смеси уже на стадии ее приготовления. Наполнители влияют на её структуру и свойства путем перераспределения характера и значений сил, возникающих между тонкими частицами твердой фазы и жидкой средой. Сам по себе микронаполняющий эффект является следствием целого ряда взаимосвязанных воздействий дисперсной составляющей на цементную систему в процессе ее гидратации. Комплексный учет таких воздействий возможен только при наличии достаточно эффективного инструмента для исследования кинетики гидратации цементных систем при различных ее исходных характеристиках.

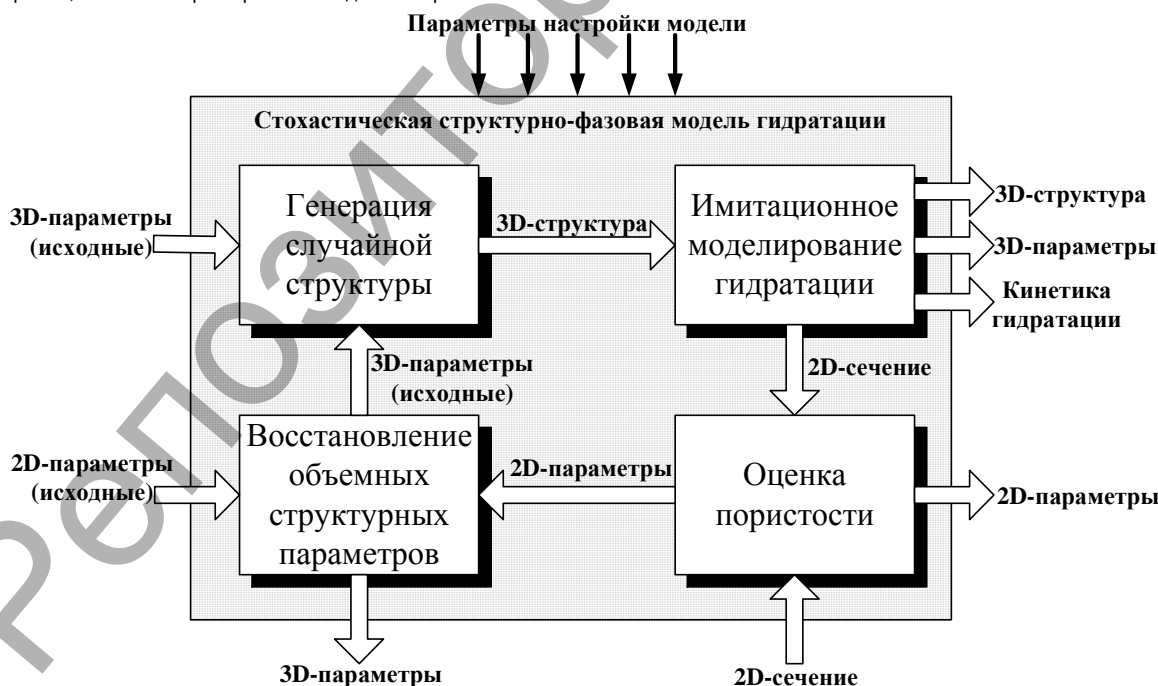


Рис. 1. Концепция стохастического структурно-фазового моделирования гидратирующей цементной системы

Разумейчик Вита Станиславовна, старший преподаватель кафедры «ЭВМ и системы» Брестского государственного технического университета.

Дереченник Станислав Станиславович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «ЭВМ и системы» Брестского государственного технического университета.

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

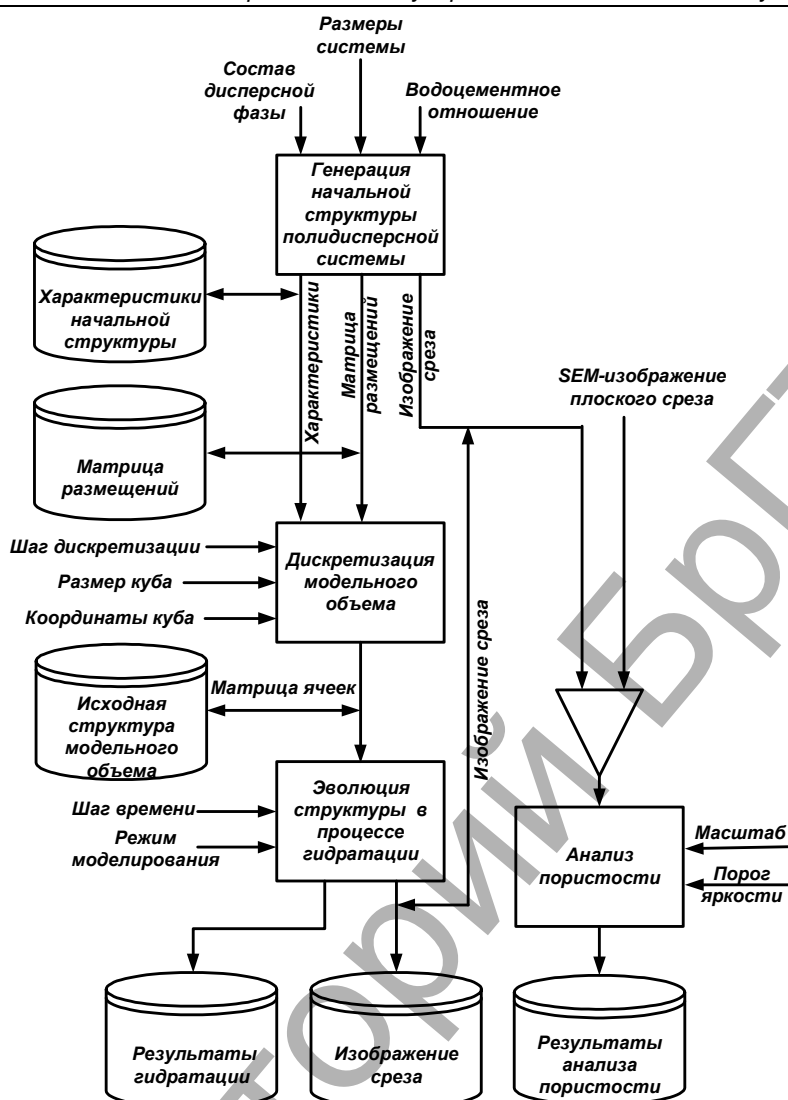


Рис. 2. Общая структура программного комплекса ИМАСК

Современное бетоноведение унаследовало целый арсенал исследовательских средств и методов фундаментальных наук для решения задач регулирования составов, структуры, процессов и свойств цементов и бетонов. Многочисленные эмпирические методы исследования механизма и кинетики гидратации вяжущих веществ – как прямые методы анализа структуры, так и разнообразные физико-химические методы – либо требуют использования специального сложного оборудования (например, калориметрических комплексов), либо не позволяют следить за ходом гидратации в динамическом режиме (построенные кинетические кривые не являются непрерывными). Более того, получаемые результаты практически невозможно воспроизвести.

Наиболее эффективной с точки зрения материальных и временных затрат, а также достоверности получаемых кинетических закономерностей, является замена проведения натуральных экспериментов с изучаемым материалом его комплексным моделированием. Однако в отечественной практике не существует ни одной адекватной динамической модели непрерывно изменяющейся во времени структуры цементной системы, которая являлась бы полностью контролируемой и управляемой, а также способной к воспроизведению полученных результатов.

Методы исследования. Исследования влияния микронаполнителя на гидратацию цементной системы были проведены с использованием разработанного для имитационного моделирования и анализа структуры композиционных материалов программного комплек-

са ИМАСК. Программный комплекс, разработанный в среде C++ Builder 5.0, реализует оригинальную стохастическую структурно-фазовую модель гидратирующей цементной системы. В основу данной модели положены принципы многочастичного представления случайной структуры полидисперсной системы и учета влияния микроструктурных неоднородностей системы на кинетику ее структурно-фазовой эволюции в процессе гидратации. Концепция стохастического структурно-фазового моделирования представлена на рис. 1.

Генерация сложной трехмерной структуры полидисперсной системы осуществляется внерешеточным методом моделирования [1], базируясь на следующих предпосылках и допущениях. Во-первых, дисперсную систему, с точки зрения статистической физики, следует считать макроscopicки однородной и изотропной средой. Во-вторых, частицы приближаются сферами, радиусы которых соответствуют определенному гранулометрическому составу фазы. Гидратационное развитие полидисперсной многофазной структуры моделируется при помощи регулярного векторного клеточного автомата с континуальным множеством состояний [2]. Для инициализации автомата применен способ решеточного представления внерешеточной модели полидисперсной многофазной системы на основе метода Монте-Карло [3].

На рисунке 2 приведена общая структура разработанного программного комплекса ИМАСК.

К главным преимуществам программного комплекса ИМАСК можно отнести, в первую очередь, возможность выявления локальных неоднородностей структуры, однородной в макроscopicком

Таблица 1. Фазовый состав цементного порошка

Фаза	C3S (3CaO·SiO ₂)	C2S (2CaO·SiO ₂)	C3A (3CaO·Al ₂ O ₃)	CA (CaO·Al ₂ O ₃)	C4AF (4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃)	GYPS (CaSO ₄ ·2H ₂ O)
Массовая доля, %	51	16	3	10	7	13
Плотность, г/см ³	3,15	3,28	3,03	3,01	3,73	2,32

Таблица 2. Гранулометрический состав цементного порошка

Диапазон диаметров, мкм	2–4	4–6	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18	18–20
Массовая доля зерен	0,162	0,136	0,125	0,075	0,095	0,064	0,056	0,053	0,044
Количественная доля зерен	0,7659	0,1484	0,0507	0,0144	0,0100	0,0041	0,0023	0,0015	0,0009

Диапазон диаметров, мкм	20–22	22–24	24–26	26–28	28–30	30–32	32–34	34–36	36–38
Массовая доля зерен	0,041	0,036	0,036	0,021	0,015	0,015	0,012	0,003	0,010
Количественная доля зерен	0,00063	0,00042	0,00033	0,00015	0,00009	0,00007	0,00005	0,00001	0,00003

Таблица 3. Характеристики исходной структуры цементных систем

водотвердое отношение (по массе)	массовая доля в порошке наполнителя	объемная доля в порошке наполнителя	плотность цементного порошка	водотвердое отношение (объемное)	объемные доли			водоцементное отношение (по массе)	количество частиц в единице объема	
					воды	цемента	наполнителя		частиц цемента	частиц наполнителя
0,3	0	0,00	3,04	0,912	0,477	0,523	0	0,30	0,00725	0
0,3	0,08	0,09	3,00	0,901	0,474	0,478	0,05	0,33	0,00671	0,00058
0,3	0,2	0,22	2,95	0,886	0,470	0,412	0,12	0,38	0,00588	0,00147
0,3	0,28	0,31	2,92	0,876	0,467	0,369	0,16	0,42	0,00532	0,00207
0,45	0	0	3,04	1,368	0,578	0,422	0	0,45	0,00585	0
0,45	0,07	0,08	3,01	1,354	0,575	0,391	0,034	0,48	0,00547	0,00041
0,45	0,1	0,11	3,00	1,348	0,574	0,378	0,048	0,50	0,00531	0,00059
0,45	0,13	0,15	2,98	1,342	0,573	0,364	0,062	0,52	0,00515	0,00077
0,45	0,19	0,21	2,96	1,331	0,571	0,338	0,091	0,57	0,00482	0,00113

представлении, в ходе же моделирования влияние на структуру и фазовые переходы этих локальных неоднородностей учитывается автоматически. Помимо этого, реализуемая программным комплексом стохастическая структурно-фазовая модель гидратирующей цементной системы полностью контролируема – это предполагает возможность исследования влияния на свойства материала отдельно выбранных параметров, полностью (либо частично) исключая влияние других, обеспечивая, помимо всего прочего, воспроизводимость полученных результатов.

Исходные данные. Для изучения влияния на кинетику гидратации цементной системы процентного содержания (в общей массе наполненного цементного порошка) тонкомолотого кварцевого песка, взятого в качестве инертного наполнителя, была проведена серия вычислительных экспериментов при различных исходных соотношениях масс воды затворения и цементного порошка.

Фазовый состав исследуемого цементного порошка и характеристики его исходных фаз представлены в таблице 1, распределение размера частиц соответствует гранулометрическому составу порошка СЕМ I, представленному в таблице 2 [4].

Гранулометрический состав наполнителя (кварцевого песка) был принят равным гранулометрическому составу исходного цементного клинкера. Одинаковый гранулометрический состав обеспечивает равноценное, по ряду физических свойств, замещение цемента наполнителем и предоставляет возможность их совместного помолла,

что, в свою очередь, упрощает этот процесс, и повышает однородность смешивания (более равномерное размещение частиц наполнителя в системе).

В работе [5] отмечается, что использование в портландцементе с $W/C=0,45$ до 5% наполнителя не оказывает никакого влияния на его свойства, и чем ниже водоцементное отношение, тем большая доля цемента может быть замещена наполнителем. Отталкиваясь от этого, для изучения были выбраны цементные системы с $W/C=0,3$ и $W/C=0,45$, а количество наполнителя варьировалось от 0 до 30% от массы цемента.

Результаты вычислительных экспериментов. В таблице 3 представлены характеристики различных по количеству воды затворения и доле наполнителя цементных систем, полученные в результате моделирования их исходной структуры. Количество воды затворения определяется водотвердым отношением W/S (water to solid), т.е. отношением массы жидкой фазы (воды) к массе твердой фазы (цемента и наполнителя). Так как плотность наполнителя (равная 2,65 г/см³) меньше общей плотности цемента марки СЕМ I (равной 3,04 г/см³), объемная доля в порошке наполнителя превышает его массовую долю. По этой же причине общая плотность наполненного цементного порошка и объемное водотвердое отношение также оказываются меньшими по сравнению с цементом без наполнителя. Уменьшение количества воды приводит к уплотнению исходной структуры и уменьшению начальной пористости цементной системы.

Из данных, приведенных в таблице 3 также видно, что суммарное количество зерен цемента и наполнителя в единице объема возрастает с увеличением процентного содержания наполнителя, а это означает увеличение площади поверхности твердой фазы, на которой "оседают" и растут продукты гидратации. Чем выше эта площадь (при таком же количестве новообразований), тем позднее на зернах цемента возникнут непроницаемые гидросиликатные оболочки (тем более завершеным будет процесс гидратации).

Более того, реальное (или эффективное) водоцементное отношение в системах с наполнителем при практически том же количестве воды и значительно меньшем количестве цемента оказывается значительно выше водотвердого отношения – эффект своего рода «разбавления» (разжижения) цементной смеси, который в отсутствие наполнителя несомненно привел бы к ускорению процесса гидратации.

Таким образом, логичным было бы предположить улучшение исходных свойств структуры наполненной цементной системы.

Однако анализ кинетики гидратации цементных систем с замещением части цемента инертным наполнителем и без него показывает совершенно другие, нежели ожидалось, результаты. Если говорить о степени гидратации твердой фазы (цемента с микронаполнителем) в целом, то она будет меньше соответствующей степени гидратации цемента на величину, пропорциональную доле наполнителя, который в гидратации не принимает активного участия.

Так, при известной объемной доле наполнителя K_{filler}^V , такая величина определяется как:

$$\alpha_{cement} - \alpha_{solid} = \alpha_{cement} \cdot K_{filler}^V, \quad (1)$$

где α_{cement} – степень гидратации цемента, α_{solid} – степень гидратации твердой фазы.

Даже в случае полной гидратации цемента в системе останется негидратированный наполнитель, а достижимая полнота (степень гидратации твердого не превысит некоторой максимальной величины:

$$\alpha_{solid}^{max} = 1 - K_{filler}^V, \quad (2)$$

Таким образом, чтобы получить те же характеристики гидратации всей твердой фазы в системе с наполнителем, необходимо, чтобы гидратация непосредственно цемента в этой системе приобрела от эффекта разбавления начальное ускорение, равное по величине K_{filler}^V .

Как видно из рисунка 3, ускорение гидратации цемента если и происходит, то его значение не столь существенно, и кривые изменения во времени степени гидратации, соответствующие различным долям наполнителя, все же располагаются ниже кривой для системы без наполнителя.

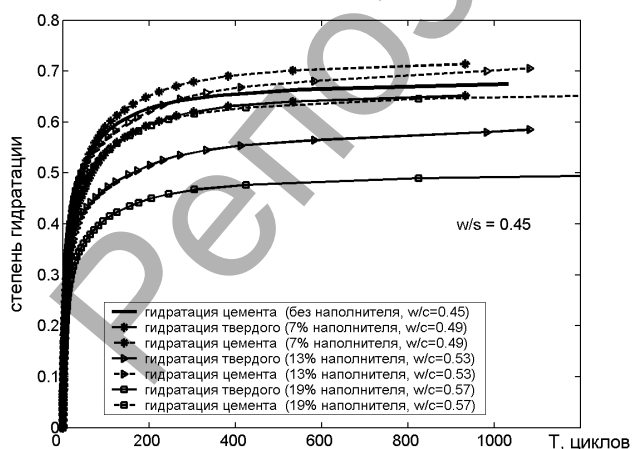


Рис. 3. Гидратация твердой фазы наполненной цементной системы с исходным водотвердым отношением $w/s=0,45$ при различных процентах добавки наполнителя (тонкие сплошные линии) в сравнении с гидратацией ее только цементной составляющей (пунктирные линии) и гидратацией без добавки наполнителя (жирная линия)

Более того, несмотря на значительное увеличение реального водоцементного отношения ($w/c=0,57$) в системе с 19% наполнителя, по сравнению с системой без наполнителя ($w/s=w/c=0,45$), гидратация цемента происходит медленнее (на рисунке 4 пунктирной линией показано изменение во времени степени гидратации цемента в системе с 19% наполнителя), в то время как в отсутствие наполнителя такое же водоцементное отношение привело бы к большей скорости гидратационных процессов (тонкая сплошная линия). Снижение эффекта разбавления или его полное подавление, очевидно, связаны с тем, что обводненные зерна наполнителя, во-первых, адсорбируют связывающую некоторое количество воды, уменьшая тем самым эффективное водоцементное отношение, а во-вторых, препятствуют своим размещением в системе доступу свободной воды к поверхности зерен цемента. И чем больший процент наполнителя в цементной системе используется, тем больше он препятствует гидратации.

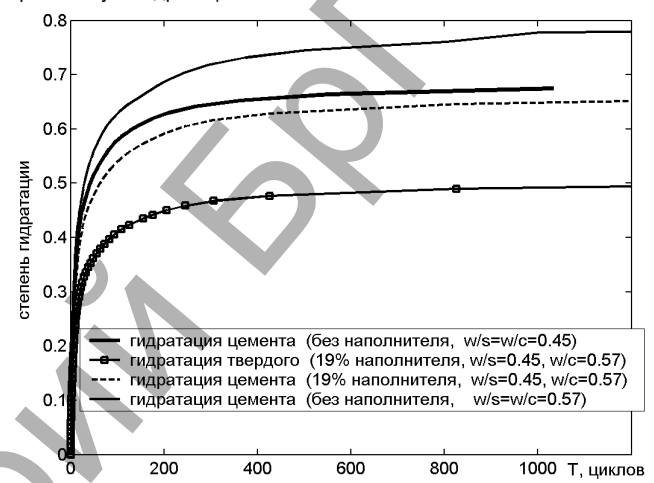


Рис. 4. Гидратация твердой фазы цементной системы с исходным водотвердым отношением $w/s=0,45$ и 19% наполнителя (маркированная тонкая сплошная линия) в сравнении с гидратацией ее только цементной составляющей (пунктирная линия) и гидратацией без добавки наполнителя (жирная линия)

В цементных системах с изначально более низким водоцементным отношением эффект разбавления от использования наполнителя более ощутим. Но, как видно из рисунка 5, даже в системе с $w/c=0,3$ простое применение инертного наполнителя, так или иначе, приводит к замедлению гидратации твердой фазы.

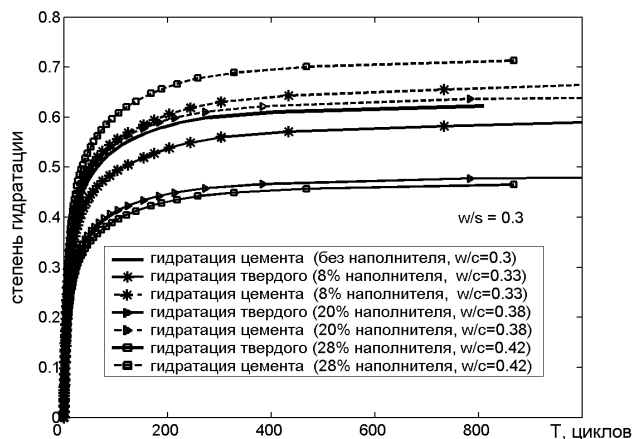


Рис. 5. Гидратация твердой фазы наполненной цементной системы с исходным водотвердым отношением $w/s=0,3$ при различных процентах добавки наполнителя (тонкие сплошные линии) в сравнении с гидратацией ее только цементной составляющей (пунктирные линии) и гидратацией без добавки наполнителя (жирная линия)

Наиболее существенными характеристиками гидратирующего цементного композита являются общая капиллярная пористость, а также доля геля, определяемая как отношение суммарного объема новообразований (твердых продуктов гидратации, включая поры геля) к общему объему пространства, доступного для их размещения. На рисунках 6–9 представлены кривые уменьшения капиллярной пористости гидратирующего материала и увеличения доли геля в его составе в процессе гидратации, при различных исходных значениях водотвердого отношения и процента наполнителя.

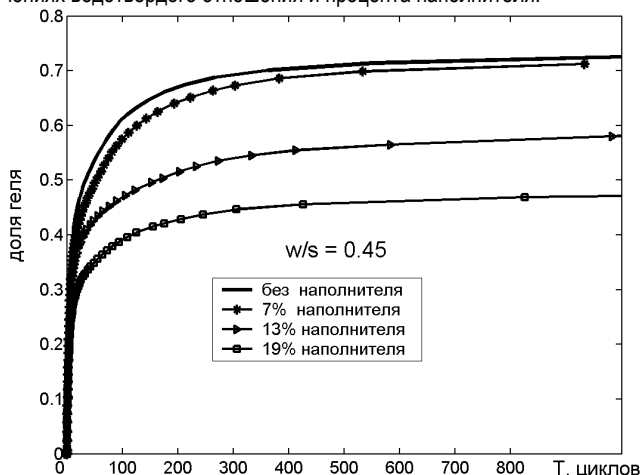


Рис. 6. Кинетика изменения доли геля в составе гидратирующего материала с начальным $w/s=0,45$ для различных исходных значений процента наполнителя

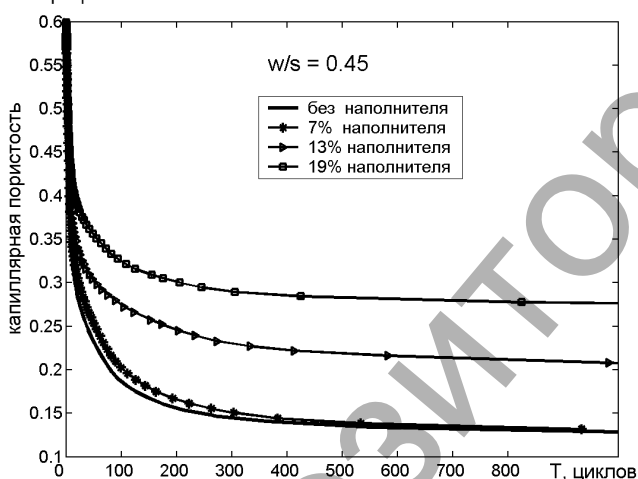


Рис. 7. Кинетика изменения капиллярной пористости гидратирующего материала с начальным $w/s=0,45$ для различных исходных значений процента наполнителя

Заключение. Исследование влияния микронаполнителя на процессы формирования микроструктуры цементного камня методом структурно-фазового имитационного моделирования позволило сделать следующие выводы:

- замещение некоторого количества клинкерной составляющей цементного порошка инертным наполнителем приводит к снижению скорости гидратации цементного композита;
- использование в цементном порошке микронаполнителя в количестве до 7 % практически не влияет на пористость цементного камня;
- увеличение содержания микронаполнителя (свыше 13%) приводит к существенному повышению капиллярной пористости материала (в 1,5 раза и более).

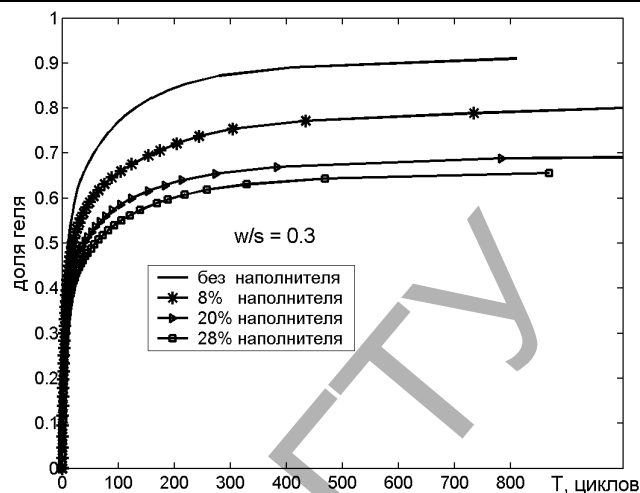


Рис. 8. Кинетика изменения доли геля в составе гидратирующего материала с начальным $w/s=0,3$ для различных исходных значений процента наполнителя

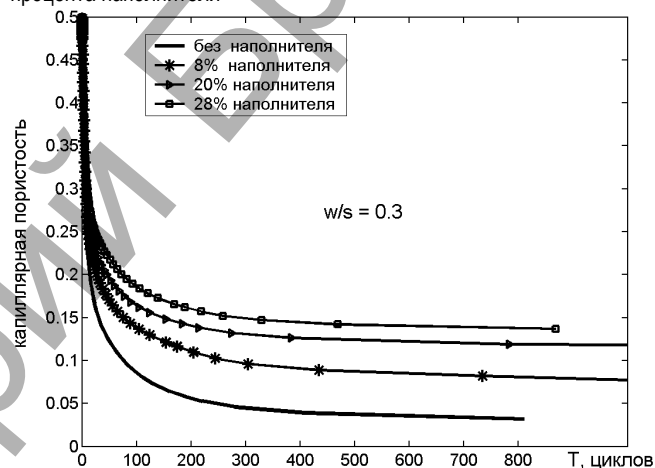


Рис. 9. Кинетика изменения капиллярной пористости гидратирующего материала с начальным $w/s=0,3$ для различных исходных значений процента наполнителя

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дереченник, С.С. Внерешеточные модели дисперсных фаз в исследованиях структуры цементных композитов / С.С. Дереченник, В.С. Разумейчик, В.В. Тур // Строительство на основе оптимизированного энергетического потенциала: материалы III Международной НТК. – *Częstochowa*, 2005.
2. Разумейчик, В.С. Структурно-химическое моделирование гидратации цементного композита / В.С. Разумейчик // Вестник БрГТУ. Сер. Строительство и архитектура. – 2006. – № 1(38). – С. 18–25.
3. Разумейчик, В.С. Проблемы решеточного представления внерешеточной модели полидисперсной системы / В.С. Разумейчик, А.С. Дереченник // Современные проблемы математики и вычислительной техники: сб. материалов IV Республиканской НТК молодых ученых и студентов (28–30 ноября 2005, Брест). – Брест: БГТУ, 2005. – С. 58–60.
4. Филимонова, Н.В. Приложения к расчету базовых параметров обобщенной модели расширяющейся цементной системы / Н.В. Филимонова, В.В. Тур // Вестник БрГТУ. Сер. Строительство и архитектура. – 2006. – № 1(38). – С. 23–40.
5. Bentz, D.P. Modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D / D.P. Bentz // *Cement and Concrete Composites*. – 2006. – Vol. 28. – P. 124–129.

Материал поступил в редакцию 26.01.12

RAZUMEICHIK V.S., DERECHENNIK S.S. The influence of microfiller on the hydrated cement microstructure forming

The influence of inert fine filler on the hydration kinetics of the cement composite is investigated using the software package of simulation and analysis of the composites structure. It is shown that the replacement of some cement clinker by inert filler results in reducing of hydration rate of cement composite and might cause a substantial rising of capillary porosity of material.

УДК 624.012.46

Драган А.В., Тур В.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА ДЕЙСТВИЮ РАСТЯГИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ

1. Введение. В настоящее время существует значительное число расчетных методик, предлагаемых для определения параметров трещиностойкости железобетонных элементов. Выполненный авторами статьи анализ имеющихся на данный момент предложений позволил произвести их некоторую систематизацию. В результате чего, все существующие предложения по расчету ширины раскрытия трещин были разделены на четыре основные группы:

1. Эмпирические зависимости (ACI 224.2R-86 [1], Gergely P. and Lutz L.A. [2], Мулин Н.М. [3], Гуца Ю.П. [4] и др.).
2. Выражения, основанные на основании теории механики разрушения (Пирадов А.Б., Гвелесиани Л.О., Пирадов К.А., Гузев Е.А. [5, 6], Oh В.Н., Kang Y.-J. [7], Shah S.P., Swartz S.E. [8], и др.).
3. Выражения, базирующиеся на теории «tension stiffening» (TST) (CEB-fib Model Code [9], Eurocode2 [10], Pedziwiatr J. [11], СНБ 5.03.01-02 [12], Мурашев В.И. [13], Немировский Я.Н. [14] и др.).
4. Зависимости, полученные на основании анализа напряженно-деформированного состояния арматуры и растянутого по длине участка между трещинами (Holmberg A [15], Farra В. [16], Noakowski P. [17], Alvares M. [18], предлагаемый подход и др.).

Как видно из представленной классификации, в качестве классификационного признака были приняты общие подходы, принятые в той или иной группе предложений для получения расчетных зависимостей.

В современной теории трещиностойкости наибольшее распространение получили подходы двух последних групп. Что же касается, эмпирического подхода и подхода, базирующегося на теории механики разрушения, то ограниченность их применимости связана с особенностями получения (для выражений первой группы) и использования расчетных зависимостей в инженерной практике (для выражений второй группы).

Выражения третьей и четвертой группы, схожи в понимании механизма образования и раскрытия трещины. Под шириной раскрытия трещины понимается разница в удлинениях арматуры и бетона, отнесенная к некоторому длине элемента (расстоянию между трещинами). Ключевое отличие заключается в способах определения разницы относительных деформаций материалов и расстояния между трещинами. В выражениях, полученных на основе TST, разница относительных деформаций арматуры и бетона на участке между трещинами определяется, по существу, путем умножения величины относительных деформаций в сечении с трещиной на безразмерный коэффициент Ψ , который характеризует неравномерность распределения относительных деформаций по длине участка между трещинами. На наш взгляд, возможность учета неравномерности деформирования арматуры и бетона на участке между трещинами по средством одного лишь коэффициента весьма спорно. Расстояние между трещинами (S_{rm}) определяется также весьма упрощенно. В общем случае, выражение для определения S_{rm} может быть получено из условия равновесия, составленного для участка железобетонного элемента, заключенного между сечением с трещиной и сечением, расположенном посередине между двумя соседними трещинами, и скорректировано с учетом эмпирических коэффициен-

тов. Представленные выше особенности к определению ключевых параметров в выражениях третьей группы не могут не сказываться на точности результатов, получаемых с их применением.

Выражения, полученные в рамках моделей четвертой группы, по мнению авторов, позволяют в наиболее полной мере оценить реальную картину развития трещины, поскольку они базируются на законах совместной работы и деформирования материалов под нагрузкой. Очевидно, что точность результатов, получаемых с использованием выражений данной группы, на прямую зависит от адекватности идеализированных диаграмм, применяемых в расчетных моделях для описания физических законов (законов деформирования и закона сцепления). Тем не менее, по мнению авторов, именно комплексный методологический подход к рассмотрению механизма образования и раскрытия трещины, является наиболее оправданным и позволяет получить результаты, достаточно близко приближенные к реальным значениям исследуемого параметра.

2. Базовые положения предлагаемого подхода

2.1. *Общие представления о сопротивлении железобетонного элемента действию растягивающей нагрузки.* Сопротивление железобетонного элемента действию растягивающей нагрузки будет рассматриваться на примере центрально армированного железобетонного элемента, подвергнутого осевому растяжению. Такой элемент позволяет моделировать работу как центрально растянутого стержня, так и растянутой зоны изгибаемого или внецентренно нагруженного железобетонного элемента.

При приложении к рассматриваемому элементу внешней растягивающей нагрузки в торцевых сечениях, которые могут условно считаться трещинами, вся растягивающая нагрузка воспринимается исключительно арматурным стержнем. По мере приближения к центру элемента, часть усилия, воспринимаемого арматурой, посредством сил сцепления, возникающих в контактном слое, передается от арматурного стержня на бетон. Последний при этом постепенно включается в работу на восприятие растягивающей нагрузки и тем самым разгружает арматурный стержень. Подобный механизм перераспределения усилий между арматурным стержнем и окружающим его бетоном соответствует постепенному снижению величины относительных деформаций арматуры и, соответственно, увеличению деформаций бетона на графиках, характеризующих распределение относительных деформаций по длине элемента (рис. 1а).

В некотором сечении, отстоящем на расстоянии l_k деформации арматуры и бетона выравниваются ($\epsilon_s = \epsilon_{ci}$), арматура и бетон работают совместно и каждый элемент сечения воспринимает часть внешней нагрузки, пропорциональную его жесткости. Таким образом, по длине железобетонного элемента, при действии внешней растягивающей нагрузки могут быть выделены две характерные зоны (рис. 1):

- зона совместного деформирования – $\epsilon_s = \epsilon_{ci}$
- зона перераспределения усилий, длиной l_k

В соответствии с изложенными выше представлениями о механизме перераспределения усилий между арматурой и растянутым бетоном, образование трещины в рассматриваемом элементе может

Драган Алексей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурных конструкций Брестского государственного технического университета.

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

Строительство и архитектура