DOI 10.15593/2409-5125/2017.01.11
УДК 004.942

Ю.Е. Курбатов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СТРУКТУРНО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИБРОБЕТОННОГО КОМПОЗИТА

Описание совместной работы разнородных по свойствам фаз в рамках структурно-имитационного моделирования композитов является весьма актуальной задачей в строительной сфере. В данной работе автором выполнен аналитический обзор существующих подходов к моделированию такой сложной композиционной структуры, как фибробетон. Продемонстрированы этапы тщательного изучения процесса моделирования матрицы, заполнителя, фибры и пор, включающие в себя создание их геометрии и ориентации элементов в пространстве; назначение эффективных свойств; закрепление созданной модели и ее нагружение. Представлены различные варианты геометрической формы заполнителя, пор, указаны диапазоны варьирования их характерными размерами и ориентацией в пространстве цементной матрицы. Данная статья является основой для проведения вычислительного эксперимента, включающего в себя все вышеуказанные этапы для получения новых данных о процессе постепенного накопления повреждений в структуре фибробетона при воздействии статической нагрузки.

Ключевые слова: структурно-имитационное моделирование, начальные дефекты структуры, концентрация включений, седиментационные явления, нормальный закон распределения.

Повышение эффективности строительного производства, снижение стоимости и трудоемкости технологических процессов и ряд других актуальных задач в строительной сфере неразрывно связаны с применением и развитием новых прогрессивных строительных материалов [1]. На сегодняшний день одним из наиболее перспективных конструкционных материалов является дисперсно-армированный фибробетон. В общем случае под фибробетоном понимают композиционный материал, состоящий из

Курбатов Ю.Е. Проблемы и возможные направления решения задачи структурно-имитационного моделирования фибробетонного композита // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 1. – С. 126-139. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.01.11

Kurbatov Y. Problems and possible directions of solving the task of structural-simulation modeling of fiber-reinforced concrete composite. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2017. No. 1. Pp. 126-139. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.01.11

цементной матрицы, с равномерным распределением по ее объему ориентированных определенным образом или хаотично расположенных дискретных волокон (фибр) различного происхождения [2]. Отличительными признаками фибробетонов являются высокая анизотропия и дискретность, что позволяет выделить их в самостоятельную и очень ценную группу конструкционных материалов с присущими только им особенностями структуры и свойств. Структура фибробетона представляет собой высококонцентрированную грубодисперсную систему, в которой имеют место межчастичные контактные взаимодействия, в том числе между цементным камнем и армирующим волокном. При этом становится очевидной необходимость представления физико-механических свойств фибробетонных композитов в виде математических зависимостей от их внутреннего строения и внешних воздействий в заданных условиях эксплуатации. Эти зависимости позволяют выявить факторы, обеспечивающие формирование наиболее эффективной структуры материалов, а также оценить долговечность и надежность конструкций без длительных и дорогостоящих натурных экспериментов. Описание подобных сложноструктурированных систем должно предусматривать отражение распределения в объеме, взаимной ориентации и сопряжения структурообразующих элементов, а также учет их совместной работы на различных уровнях. Данный подход подразумевает использование технологии структурно-имитационного моделирования.

Под термином «имитационное моделирование» [3] понимается работа с такими математическими моделями, с помощью которых результат нельзя заранее вычислить или предсказать, поэтому для прогнозирования поведения реальной сложной системы необходим имитационный эксперимент на модели при заданных исходных данных. Имитируя различные реальные ситуации на имитационных моделях, исследователь получает возможность решения задач сравнения различных вариантов структуры системы; определения степени влияния изменений параметров системы и начальных условий ее поведения на показатель эффективности моделируемой системы. Особенностью имитационного моделирования является то, что имитационная модель позволяет воспроизводить моделируемые объекты с сохранением их поведенческих свойств (т.е. последовательности чередования во времени событий, происходящих в данной системе).

Описание совместной работы разнородных по свойствам фаз в рамках структурно-имитационного моделирования можно осуществить в ходе проведения вычислительного эксперимента, с применением численных методов, наиболее развитым из которых является метод конечных элементов (МКЭ). Вычислительный эксперимент позволяет изучить взаимосвязь структуры какого-либо материала с его свойствами, при этом сократив продолжитель-

ность исследований. Кроме того, при проведении вычислительного эксперимента можно получить результаты, трудно достижимые в натурном эксперименте [4].

В работе [5] предложена имитационная модель структуры бетона на макроуровне в виде двухкомпонентной системы, состоящей из матрицы – цементно-песчаного камня, и включений – зерен заполнителя, в виде выпуклых многоугольников. На границе матрицы и включений предусмотрена контактная зона с отличными от матрицы и включений свойствами, а в объеме материала (в матрице) случайным образом располагаются начальные дефекты структуры – поры различных форм и размеров. При этом сами образцы бетона и его компонентов на уровне макроструктуры моделируются пластиной единичной толщины, ширина и высота которой равны стандартным размерам образцов. По мнению авторов, подобная структурно-имитационная модель имеет геометрические и физические параметры, достаточно близкие к параметрам реального образца. Всего в статье [5] предложено две модели структуры бетона – на пористых заполнителях (при этом они сами могут иметь начальные дефекты), и на плотных заполнителях. Данные модели представлены на рис. 1.

Рис. 1. Модель структуры бетона на пористых (а) и плотных (б) заполнителях: 1 – включение; 2 – начальный дефект включения; 3 – то же матрицы; 4 – то же контактной зоны; 5 – матрица

Включения моделируются выпуклыми многоугольниками и имеют следующие геометрические параметры (рис. 2): условный радиус R_b , число вершин n_b и их угол θ_b относительно нагрузки q , координаты центра X_b

и Y_B , концентрацию φ_B и коэффициент формы k_φ включений, а также физические параметры – модуль упругости E_B , коэффициент Пуассона μ_B . При этом R_B , X_B , Y_B , n_B , θ_B и k_φ изменяются случайным образом на заранее определенных интервалах: $[R_{B\min}; R_{B\max}]$, $[A; H]$, $[3; 6]$, $[0; 2\pi]$ и $[K_{j\min}; K_{j\max}]$. Концентрация включений φ_B остается величиной постоянной.

Рис. 2. Геометрические параметры включения

Стороны многоугольников моделируют контактную зону включений (рис. 3). Ее геометрическим параметром является ширина δ_k (может принимать постоянное или переменное значение), а физическими параметрами – критические коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) при нормальном отрыве k_{ICk} и плоском сдвиге k_{IIck} .

Рис. 3. Включения с постоянной (а) и переменной (б) шириной контактной зоны: 1 – матрица; 2 – включение; 3 – контактная зона

Следует отметить, что геометрические характеристики параметров макроструктуры бетона авторы устанавливали путем проведения натурного эксперимента. Форму крупного заполнителя изучали на аншлифах бетона. Визуальными наблюдениями (рис. 4) было установлено, что практически

Рис. 4. Аншлиф бетона:
1 – цементно-песчаный камень;
2 – заполнитель

все (около 96 %) контуры заполнителя выпуклы и, следовательно, могут быть описаны выпуклыми многоугольниками. Статистическая обработка результатов 460 измерений показала, что 10 % сечений заполнителя могут быть описаны треугольниками, 50 % – четырехугольниками, 30 % – пятиугольниками и 10 % – шестиугольниками. На это соотношение практически не влияет вид, размер и фракционный состав заполнителя.

Что касается начальных дефектов бетона и его компонентов на уровне макроструктуры – поры, в работе [5] моделируются круглыми отверстиями, на контур которых выходят две коллинеарные трещины, и имеют следующие геометрические параметры: радиус поры r_d , начальная длина трещин l_{0d} , их ориентация α_d относительно нагрузки q , координаты дефектов на пластине x_d , y_d и их число n_d (рис. 5).

Рис. 5. Геометрические параметры начального дефекта макроструктуры бетона

Радиусы r_d в предложенной модели изменяются по заданному закону распределения пор по размерам. Начальная длина трещин l_{0d} фиксирова-

на и составляет $0,184r_d$ [6]. Ориентация дефекта относительно нагрузки q изменяется на интервале от 0 до 2π . Координаты центра являются независимыми случайными величинами.

В тяжелом бетоне дефектностью включений можно пренебречь, так как она представлена в основном нарушением контакта гранитного щебня с цементно-песчаным камнем вследствие седиментационных явлений. Данный факт был установлен авторами [5] по результатам люминесцентной дефектоскопии (рис. 6).

Рис. 6. Люминесцентная дефектоскопия тяжелого бетона: 1 – цементно-песчаный камень; 2 – заполнитель

Таким образом, при моделировании процессов разрушения предложенная в работе [5] модель бетонного образца рассматривается в виде пластины единичной толщины. По утверждению авторов, при одноосном сжатии это не приводит к существенным погрешностям в сравнении с действительным объемным напряженным состоянием элементов. Кроме того, принятое упрощение позволяет использовать для описания напряженного состояния структурных элементов бетона известные решения теории упругости на плоскости, исходя из которых процесс разрушения можно моделировать на уровне макроструктуры бетона с включением структурных элементов данного (матрица, включения, контактная зона, начальные дефекты) и предшествующего (поля матрицы и включений, микротрещины) уровней. В таком случае разрушение бетонного образца будет соответствовать моменту образования неустойчивого структурного элемента – магистральной трещины, выходящей на стороны образца, представляющие собой естественную границу для рассматриваемой материальной системы на уровне макроструктуры.

В работах [7, 8] механизм разрушения бетона исследуется на основе поуровневого моделирования его структуры. При этом особенно отмечается существенное влияние пористости на механические свойства цементного камня. Для исследования влияния пор на НДС цементного камня на уровне цементного геля в качестве расчетного метода автором использован метод конечных элементов (МКЭ) на базе твердотельного моделирования, реализованный в программе ANSYS. Применение МКЭ на базе структурно-имитационных моделей позволяет моделировать про-

цесс трещинообразования в виде, близком по физической сути к реальному, охватывающему не только поровое пространство, но и твердую фазу. Данная методика в явном виде учитывает физическую и геометрическую неоднородность композиционного материала [9]. Расчетный комплекс ANSYS современного поколения позволяет создавать и рассчитывать *трехмерные* модели с самой разнообразной геометрией и максимальной визуализацией получаемых результатов. Следует отметить, что трехмерное твердотельное моделирование позволяет рассматривать механизм трещинообразования бетона при объемном процессе разрушения.

Принятая в работах [7, 8] расчетная схема представляет собой куб из однородного изотропного сплошного материала (геля), в котором в случайном порядке расположены пустоты (поры) различных размеров. В связи с малым размером пор, при составлении расчетной схемы производилось масштабное моделирование с увеличением линейных размеров в 10^7 раз. В результате в качестве объекта исследования принят куб размером $100 \times 100 \times 100$ мм, в котором размещались поры в виде шаров диаметрами 15, 20 и 30 мм. На рис. 7 приведена указанная конечно-элементная твердотельная модель цементного геля с пористостью 17,7 %.

Рис. 7. Конечно-элементная модель цементного геля с порами

Геометрическая основа данной модели создавалась в программе твердотельного моделирования SolidWorks и затем передавалась в ANSYS для проведения дальнейших расчетов. В качестве конечного элемента в расчетных схемах был принят элемент SOLID92, представляющий собой объемный четырехгранник с десятью узлами. В расчете автором было принято допущение о том, что материал имеет модуль упругости, равный 70 МПа, и обладает линейными свойствами.

Принятый модуль упругости соответствует усредненному значению для цементного геля, определенному эмпирическим путем в работах [10, 11].

Разбивка на конечные элементы производилась автоматически с использованием свободного способа разбивки, предусмотренного в ANSYS. Расчетная схема образована 83 526 конечными элементами. Количество узлов составило 128 953. Для моделирования работы материала «в массиве», боковые и нижняя грани куба были закреплены (запрещены линей-

ные перемещения относительно соответствующих координат). По верхней грани прикладывалась равномерно распределенная сжимающая нагрузка. Увеличение нагрузки, приложенной к приведенной расчетной схеме, производилось в пошаговом режиме. Тем самым моделировался кинетический характер разрушения, связанный с постепенным накоплением дефектности структуры по мере роста нагружения. Для имитации разрушения материала использовалась функция Birth&Death («Рождение и смерть») элементов.

Процесс расчета предлагаемой в работах [7, 8] модели заключался в следующем: в конце каждого шага производилась поэлементная проверка по заданному критерию. В случае превышения критерия элементы деактивировались и расчет проводится заново с сохранением напряженно-деформированного состояния, вычисленного на предыдущем шаге. На деактивируемых элементах деформации нагрузки обнулялись. Результаты расчета (рис. 8) позволяют сделать вывод, что выбранная схема закрепления и нагружения твердотельной модели не искажает картину напряженно-деформированного состояния: неоднородность полей напряжений объясняется наличием пор и их взаимным расположением. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при наличии пор появляется существенная неравномерность распределения компонентов напряжений и деформаций по объему исследуемой модели.

А.М. Харитонов [12] развивает описанный выше подход, рассчитывая обобщающую модель структуры мелкозернистого бетона с целью отследить неоднородность распределения напряжений в объеме материала, обусловленную большим различием величин модулей упругости цементного камня и заполнителя.

Для расчета автором была создана плоская модель цементно-песчаного композита (50×50 мм), в которой отражены зерна песка размером 1,0–5,0 мм и поры диаметром 0,8–2,0 мм. При моделировании процесса трещинообразования в цементном камне по МКЭ автором использован критерий разрушения, основанный на теории предельных напряжений [13]:

$$\sigma_{кр} = \sigma_1 - \beta(\sigma_2 + \sigma_3) \leq \sigma_p,$$

где $\beta = R_p / R_{сж}$ – отношение предела прочности на растяжение к пределу прочности на сжатие; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; σ_p – предел прочности материала на растяжение.

Рис. 8. Численные значения напряжений в плоскости YOX :
 a – нормальные σ_y ; b – нормальные σ_x ; $в$ – нормальные σ_z ;
 $г$ – главные σ_1 ; $д$ – главные σ_2 ; $е$ – главные σ_3

Данный критерий подразумевает разрушение материала в местах локального растяжения; при этом считается, что критерий $\sigma_{кр}$ неприменим для объяснения причин разрушения при одноосном сжатии. Однако в качестве допущения автором [12] было принято, что в моделях, учитывающих неоднородность материала, данный критерий лишен указанного недостатка. При этом разрушение бетона при центральном сжатии объясняется отрывом по площадкам, параллельным направлению действия

сжимающей силы. В таком случае причиной разрушения являются поперечные растягивающие напряжения, которые возникают в местах ослабления бетона макро- и микропорами.

На рис. 9 отражен начальный этап зарождения трещин в наиболее уязвимых местах при величине нагрузки, составляющей 30 % от разрушающей. Очевидно, что начальные трещины возникают в контактной зоне (тем самым зерна песка выключаются из работы), а также по поверхностям пор в нижней и верхней их части.

Рис. 9. Распределение напряжений $\sigma_{кр}$ при уровне нагрузки 30 % от разрушающей

Дальнейшая имитация процесса разрушения структуры мелкозернистого бетона, описанная в работе [12], заключалась в поэтапном наращивании внешней нагрузки при соблюдении условия кратковременной выдержки на отдельных ступенях нагружения. На рис. 10 приведен характер разрушения структуры при нагрузке, составляющей 70 % от разрушающей. При уровне сжимающей одноосной нагрузки $0,7P_{разр}$, как следует из рис. 10, прослеживается тенденция соединения близлежащих пор

Рис. 10. Характер разрушения структуры мелкозернистого бетона при уровне нагрузки 70 % от разрушающей (белым цветом обозначены зерна заполнителя)

микротрещинами, а также локальное разрушение контактной зоны. Однако выхода трещин на поверхность образца при этом не наблюдается.

Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождалось ростом деструкции бетона с образованием магистральных трещин, выходящих на поверхность образца при достижении разрушающего уровня нагружения. По мнению автора, полученная картина возникновения и развития трещин соответствует существующим представлениям о процессе разрушения цементных композиций и позволяет заключить, что предложенный метод моделирования процессов разрушения бетона при одноосном сжатии пригоден для теоретической оценки прочности рассматриваемых систем.

Что касается структурно-имитационного моделирования фибры, необходимо определиться с ее типом и формой. Для повышения прочностных показателей фибробетона применяются различные способы дисперсного армирования стальными, стеклянными, базальтовыми, целлюлозными, синтетическими, углеродными и другими волокнами [14].

В соответствии с указаниями учебного пособия [15], для моделирования элементов фибры удобно использовать систему MSC.PATRAN-NASTRAN, в которой для решения поставленной задачи больше всего подходит модель композита со случайной ориентацией коротких волокон в одной плоскости. Для подключения данной модели необходимо использовать методы Short Fiber 1D или Short Fiber 2D. В рамках первого метода считается, что угол ориентации волокон θ подчиняется нормальному закону распределения, для которого дифференциальная функция распределения имеет вид

$$f(\theta) = \frac{1}{\sigma_{\theta} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\theta - \theta_{av}}{\sigma_{\theta}} \right)^2 \right\},$$

где θ_{av} и σ_{θ} – математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение случайной величины θ соответственно.

Метод Short Fiber 2D позволяет создать модель композита со случайной ориентацией коротких волокон в пространстве. В данном случае ориентация волокон характеризуется уже двумя углами θ и φ сферической системы координат (рис. 11). При этом углы ориентации волокон подчиняются двумерному нормальному закону распределения.

Согласно [15], такой подход позволяет моделировать эффект «рассеивания» ориентации волокон в композитах, например из-за технологических погрешностей, тем самым предотвращая завышение жесткостных характеристик материала. Для суммирования вкладов различных ориентаций волокон, распределенных по нормальному закону, применяется схема

интегрирования Монте-Карло. При этом само интегрирование упрощается принятием допущения о том, что отклонение углов ориентации всех волокон от математического ожидания (по абсолютной величине) не превосходит утроенного среднего квадратичного отклонения. Свойства материала на каждой итерации суммируются с использованием правила смесей, причем скалярные величины, например плотность, не меняются и остаются такими же, как и у исходного материала.

Авторы [15] особо отмечают, что композиты с короткими волокнами в первом приближении являются трансверсально-изотропными. Однако случайность схемы интегрирования Монте-Карло вносит небольшой эффект взаимодействия сдвигов, в результате чего данные материалы становятся полностью анизотропными.

Таким образом, в данной работе были рассмотрены основные проблемы, возникающие при решении задачи структурно-имитационного моделирования элементов цементных бетонов в целом и фибробетонов в частности. Также предложены и обобщены возможные варианты реализации моделирования данной структуры в конкретных программных комплексах (SolidWorks, ANSYS и MSC.PATRAN-NASTRAN), разработанные специалистами в данной области. В качестве основного вывода можно заключить, что задача структурно-имитационного моделирования элементов фибробетонного композита является комплексной и требует тщательного изучения на каждом из этапов моделирования матрицы, заполнителя, фибры и пор, а именно: на этапе создания их геометрии и ориентации элементов в пространстве; на этапе назначения эффективных свойств; на этапе закрепления созданной модели и ее нагружения.

Рис. 11. Расположение фибр в сферической системе координат

Библиографический список

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: моногр. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 642 с.
2. Пухаренко Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Вестник гражданских инженеров. – 2005. – № 1. – С. 86–91.
3. Антонов А.В. Системный анализ: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 2004. – 454 с.
4. Чермашенцев В.М. Теоретические аспекты компьютерного моделирования эффективных композиционных материалов // Изв. вузов. Строительство. – 2002. – № 3. – С. 33–40.
5. Имитационная модель макроструктуры бетона / В.И. Кондращенко, В.Д. Кудрявцева, А.В. Кендюк, А.В. Семак, Е.В. Кондращенко // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2010. – № 52. – С. 21–35.

6. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.
7. Харитонов А.М. Прогнозирование трещиностойкости бетона на основе метода конечных элементов // Десятые Академические чтения РААСН. – Казань: Изд-во КГАСУ, 2006. – С. 418–420.
8. Харитонов А.М. Исследование роли системы пор в распределении внутренних напряжений в цементном камне // Ресурсосберегающие технологии в транспортном строительстве и путевом хозяйстве железных дорог: сб. тр. по материалам науч.-практ. интернет-конф. – СПб.: ОМ-Пресс, 2006. – С. 92–97.
9. Харитонов А.М. Исследование свойств цементных систем методом структурно-имитационного моделирования // Строительные материалы. Наука. – 2008. – № 9. – С. 81–83.
10. Тимашев В.В. Влияние физической структуры цементного камня на его прочность // Цемент. – 1978. – № 6. – С. 6–8.
11. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. – М.: Высшая школа, 1981. – 334 с.
12. Харитонов А.М. Принципы формирования структуры композиционных материалов повышенной трещиностойкости // Технологии бетонов. – 2011. – № 3-4. – С. 24–26.
13. Тарасенко И.И. О критериях хрупкой прочности материалов // Строительная механика и строительные конструкции. – М.: Стройиздат, 1960. – Вып. 26. – С. 18–22.
14. Лесовик Р.В., Ключев С.В. Фибробетон на композиционных вяжущих и техногенных песках Курской магнитной аномалии для изгибаемых конструкций // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 3. – С. 41–47.
15. Моделирование композитных элементов конструкций и анализ их разрушения в САЕ-системах MSC.Patran-Nastran и ANSYS: электрон. учеб. пособие / Ю.В. Скворцов, С.В. Глушков, А.И. Хромов; Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (Нац. исслед. ун-т). – Самара, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

References

1. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruksii [Composites based on dispersion-reinforced concrete. Theory and design, technology, construction]. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2011, 642 p.
2. Pukharens Yu.V. Printsipy formirovaniya struktury i prognozirovaniye prochnosti fibrobetonov [Principles of structure formation and the prediction of the fiber-reinforced concrete strength]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2005, no. 1, pp. 86-91.
3. Antonov A.V. Sistemnyi analiz [System analysis]. Moscow: Vysshaya shkola, 2004, 454 p.
4. Chermashentsev V.M. Teoreticheskie aspekty komp'yuternogo modelirovaniya effektivnykh kompozitsionnykh materialov [Theoretical aspects of computer modeling for effective composite materials]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2002, no. 3, pp. 33-40.
5. Kondrashchenko V.I., Kudryavtseva V.D., Kendyuk A.V., Semak A.V., Kondrashchenko E.V. Imitatsionnaya model' makrostruktury betona [A simulation model of the macrostructure of concrete]. *Sbornik nauchnykh trudov "Vestnik NTU "KhPI"*, 2010, no. 52, pp. 21-35.
6. Zaitsev Yu.V. Modelirovaniye deformatsii i prochnosti betona metodami mekhaniki razrusheniya [Simulation of deformation and strength of concrete by using methods of fracture mechanics]. Moscow: Stroiizdat, 1982, 196 p.
7. Kharitonov A.M. Prognozirovaniye treshchinostoikosti betona na osnove metoda konechnykh elementov [Prediction of concrete fracture toughness based on the finite element method]. *Desyatye Akademicheskie chteniya RAASN. Kazan'*: KGASU, 2006, pp. 418-420.
8. Kharitonov A.M. Issledovaniye roli sistemy por v raspredelenii vnutrennikh napryazhenii v tsementnom kamne [Investigation of the role of pores systems in the distribution of internal stresses in the cement stone]. *Resursosberegayushchie tekhnologii v transportnom stroitel'stve i putevom khozyaistve zheleznykh dorog*. Saint Petersburg: OM-Press, 2006, pp. 92-97.
9. Kharitonov A.M. Issledovaniye svoystv tsementnykh sistem metodom strukturno-imitatsionnogo modelirovaniya [The study of the cement systems properties by the method of structural-simulation modeling]. *Stroitel'nye materialy. Nauka*. 2008, no. 9, pp. 81-83.

10. Timashev V.V. Vliyanie fizicheskoi struktury tsementnogo kamnya na ego prochnost' [The influence of the physical structure of a cement stone in its durability]. *Tsement*. 1978, no. 6, pp. 6-8.
11. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savel'ev V.G. Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv [Methods of physicochemical analysis of binders]. Moscow: Vysshaya shkola, 1981, 334 p.
12. Kharitonov A.M. Printsipy formirovaniya struktury kompozitsionnykh materialov povyshennoi treshchinostoikosti [Principles of formation the structure of composite materials with increased fracture toughness]. *Tekhnologii betonov*. 2011, no. 3-4, pp. 24-26.
13. Tarasenko I.I. O kriteriyakh khrupkoi prochnosti materialov [About the criteria of material brittle strength]. *Stroitel'naya mekhanika i stroitel'nye konstruksii*. Moscow: Stroiizdat, 1960, vyp. 26, pp. 18-22.
14. Lesovik R.V. Fibrobeton na kompozitsionnykh vyazhushchikh i tekhnogennykh peskakh Kurskoi magnitnoi anomalii dlya izgibaemykh konstruksii [Fiber concrete on composite binders and technogenic sands of Kursk magnetic anomaly for flexible structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2012, no. 3, pp. 41-47.
15. Skvortsov Yu.V., Glushkov S.V., Khromov A.I. Modelirovanie kompozitnykh elementov konstruksii i analiz ikh razrusheniya v SAE-sistemakh MSC.Patran-Nastran i ANSYS [Modeling of composite structural elements and analysis of their destruction in CAE-system: MSC.Patran-Nastran and ANSYS]. – Samara, 2012.

Получено 12.01.2017

Yu. Kurbatov

PROBLEMS AND POSSIBLE DIRECTIONS OF SOLVING THE TASK OF STRUCTURAL-SIMULATION MODELING OF FIBER-REINFORCED CONCRETE COMPOSITE

The description of the diverse properties phases' joint work in the framework of structural-simulation modeling of composites is one of the most urgent tasks in the construction industry. In this paper the author carries out an analytical review of existing approaches to modeling of the complex composite structures such as fiber concrete. The stages of careful elaboration of modeling process of the matrix, filler, fibers and pores are shown. These stages include the creation of the geometry and spatial orientation of the elements; assigning effective properties; binding the created model and its loading. Various ways of forming the geometrical shape of the filler and pores are presented. The range of variation of their typical sizes and spatial orientation of the cement matrix are given. This article can serve as a basis for carrying out a computing experiment, including all the above phases for obtaining new information about the process of gradual damage accumulation in the structure of fiber-reinforced concrete under static loads.

Keywords: structural-simulation modeling, initial structure defects, concentration of inclusions, sedimentation phenomena, normal distribution law.

Курбатов Юрий Евгеньевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: YEK-STF@yandex.ru).

Kurbatov Yuri (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student, Department Construction structures and computational mechanics, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29., e-mail: YEK-STF@yandex.ru).