

## МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА

Леонович С.Н., Сидорова А.И.

Применение систем автоматизированного проектирования (САПР) для моделирования прочности конструкционного бетона позволяет значительно сократить затраты на испытания и натурное моделирование, уменьшить сроки проектирования и снизить трудоемкость проектных работ, повысить качество и уровень результатов работы. На протяжении нескольких десятилетий интенсивно изучается проблема моделирования материалов методами микромеханики, используя теорию механики сплошных сред и многошкальную теорию гомогенизации. Использование математического моделирования вместо макетирования и натуральных испытаний, применение современных компьютерных программ, таких как Autodesk 3ds Max, ANSYS, OpenFOAM позволяет создавать и редактировать трехмерные модели, проводить автоматизированные инженерные расчёты, решать линейные и нелинейные, стационарные и нестационарные пространственные задачи механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций, численно моделировать задачи механики сплошных сред.

Прочность бетона зависит от ряда факторов, основными из которых являются: его состав, технология приготовления, возраст и условия твердения, форма и размеры образцов, вид напряженного состояния и длительные процессы. Бетон при разных напряженных состояниях — сжатии, растяжении и срезе — имеет разное временное сопротивление. Эти параметры следует учитывать при моделировании прочности конструкционного бетона методами микромеханики (рисунок 1).

Модели случайной и упорядоченной гомогенизации, примененные на уровне микроструктуры материала, показывают, что сложные характеристики разрушения такого материала, как конструкционный бетон, могут быть разложены на составляющие их простые характеристики разрушения отдельных микроструктур – гидратов в бетоне.

На рисунке 2 представлена схематическая иллюстрация алгоритма многошкального моделирования конструкционного бетона. Макроскопические характеристики составляющих бетона берут свое начало в микропористых структурах и термодинамическое состояние сильно влияет на прочность и долговечность. В свою очередь, химико-физическое состояние веществ в микропористых структурах в большей степени ассоциируется со строительной механикой и действием внешних нагрузок и воздействием окружающей среды. Рассматривая идеализируемую структуру бетона, можно перейти к изучению и моделированию микроструктуры.



Рисунок 1 – Параметры, от которых зависит прочность бетона



**Рисунок 2 – Взаимосвязь макроструктуры и микроструктуры**

Основной алгоритм моделирования прочности бетона можно представить в виде блок-схемы, которая представлена на рисунке 3. Химико-физические и механические преобразования можно рассмотреть в 3D моделировании в любой определенный момент времени, если представить бетон – макрогетерогенным материалом, а микрогетерогенный материал заполнить репрезентативными элементарными объемами (REV–referential control volume), размер которых значительно меньше размеров конструкции. Следует учесть, что все преобразования не являются независимыми, но взаимосвязаны друг с другом, т.е. необходима многофакторность моделирования. Комплексное понимание взаимодействия описывается математически точки зрения параметров состояния, обычно разделяемых каждым преобразованием. Например, нужно наблюдать за температурой, давлением воды в порах, равновесной влажностью, проводимостью углекислого газа, равновесием связанного и свободного хлорида при моделировании скорости гидратации цемента, а также учитывать основной закон затвердевшего цементного камня.

Основное общее уравнение данного алгоритма:

$$\frac{\partial s(\theta_i)}{\partial t} + \text{div} J_i(\theta_i, \nabla \theta_i) - Q_i(\theta_i) = 0,$$

где

$S$  – степень насыщения пористой среды,

$J_i$  – поток  $i$ -того вещества (вода – кг/м<sup>2</sup>\*с, ионы хлорида – моль/м<sup>2</sup>\*с, теплоты – ккал/м<sup>2</sup>\*с и т.д.),

$Q_i$  – общий оператор для нужного параметра моделирования (баланс жидкости, сокращение свободных хлоридов, общее содержание CO<sub>2</sub>, тепловыделение, изменение объемной пористости).

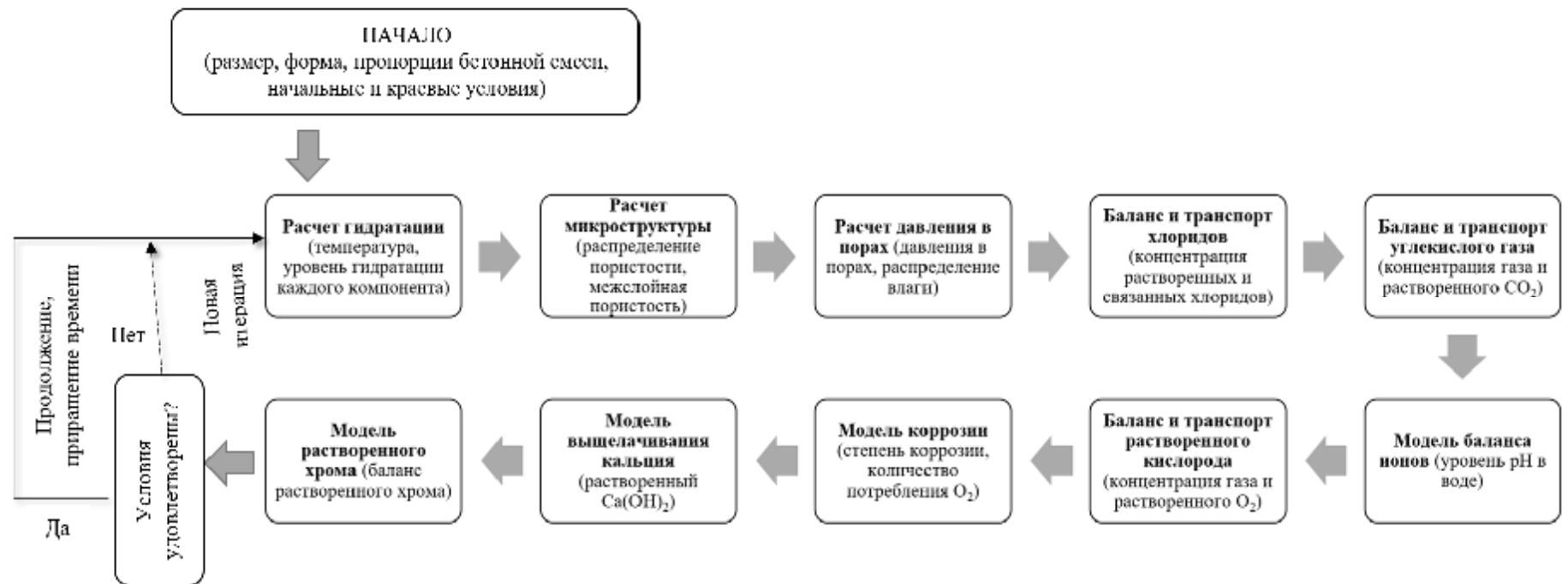


Рисунок 3 – Алгоритм моделирования прочности бетона, учитывающий разные параметры

Для изучения свойств конструкционного бетона метод компьютерного моделирования играет важную роль, потому что дает возможность решить ряд важных задач в области современного строительства, при этом использование компьютерных моделей в научных исследованиях в строительной отрасли имеет ряд неоспоримых достоинств:

— относительно невысокая стоимость компьютерного эксперимента по сравнению с натурными экспериментами, в которых необходимо иметь определенное количество строительного материала;

— возможность многократной постановки одного и того же действия, что в натуральных экспериментах крайне затруднительно и имеет высокую стоимость работ;

— возможность визуализации (представления в наглядном виде) информации.

Задаваясь различными свойствами элементов материала, с помощью моделей неоднородных структур можно изучать свойства различных композиционных материалов с одинаковой структурой на одних и тех же моделях и прогнозировать свойства разрабатываемых неоднородных материалов с зернистой структурой, а также изучать взаимодействие включений с элементами структуры.

Математический количественный анализ характеристик поведения микро- и макроструктур применяются для рационального и эффективного конструирования материалов и структур.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Технология бетона. Учебник. Ю.М. Баженов – М.: Изд-во АСВ, 2002 – 500 стр. с иллюстрациями. 3-е издание.
2. Рамачандран В., Фельдман Р., Бодуэн Дж. Наука о бетоне: Физико-химическое бетоноведение / Пер. с англ. Т.И. Розенберг, Ю.Б. Ратиновой. Подред. В.Б. Ратинова. – М.:Стройиздат, 1986. –278с.,ил. – Переводизд.: Concrete science: Treatise on Current Research / V.S. Ramachandran, R.F. Feldman, Y.Y. Beaudoin / Heyden.
3. Journal of Advanced Concrete Technology Vol.1, No. 2 91-126, July 2003, Japan Concrete Institute.
4. АндреЗауи, Микромеханика сплошной среды: Обзор. – Journal of engineering mechanics / August 2002.
5. Манг, Аингер и др. Вычислительная механика в промышленном и гражданском строительстве - Обзор основных характеристик материалов и структур. - Институт механики материалов и структур Венского технологического университета, Карлсплац 12/202, А-1040, Вена, Австрия.
6. СТБ 1310-2002 «БЕТОНЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ. Общие технические требования».
7. Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства : сборник научно-технических статей (материалы научно-методического семинара), 22–23 мая 2013 г. В 2 ч. Ч. 2 / ред. колл.: В. Ф. Зверев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2013. – 264 с. : ил. Масштабирование упругих свойств бетона и цементного теста в задачах микромеханики / В. М. Трещачко, Й. Эберхардштайнер ; Белорусский национальный технический университет (Минск), Венский технический университет (Вена).