

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ОЦЕНКЕ ХАРАКТЕРА СТРУКТУРЫ ПЕНОБЕТОНА

В.Н. ВЫРОВОЙ, доктор техн. наук, профессор, В.И. МАРТЫНОВ, канд. техн. наук, доцент, А.М. ВЕТОХ, ассистент, Е.А. МАРТЫНОВА, инженер, В.В. ЕЛЬКИН, аспирант, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Украина

**Авторы статьи предложили методики, которые при их дальнейшем усовершенствовании могут быть применены для ускоренного прогнозирования свойств ячеистых бетонов, а также для синтеза искусственных строительных композитов с прогнозируемыми структурой и свойствами.**

Одним из наиболее эффективных современных строительных материалов является ячеистый бетон. Производство и спрос на этот материал постоянно возрастают. Это требует также интенсификации и повышения эффективности научных исследований. Строительно-эксплуатационные свойства композиционных строительных материалов (КСМ), в том числе и ячеистых бетонов, непосредственно связаны с характером их структуры. При изучении процессов структурообразования и анализа структуры КСМ целесообразно использовать цели и методы системного подхода [1, 2]. Вследствие этого была поставлена цель исследований, заключающаяся в оценке характера структуры материалов макропористого строения. Исследования проводились на основании общей схемы системных исследований [3, 4]. Алгоритм исследований представлен ниже.

В качестве объекта исследований был выбран пенобетон как разновидность ячеистого бетона. Представление пенобетона в виде системы позволяет выявленные в процессе исследований закономерности распространять на ячеистый бетон в целом. Специалисты в области ячеистых бетонов, рассматривая его структуру, выделяют две фазы в качестве базовых: твердую и газовую [5]. Традиционно принято сводить свойства ячеистых бетонов к их плотности и характеру пористости. Для изучения характера пористости разработан ряд методов и инструментов, позволяющих определять размер, форму пор, распределение их по размерам и пр.

В основе проводимых авторами исследований заложена гипотеза о том, что свойства ячеистых бетонов определяются характером распределений твердой фазы. Авторами выделены элементы твердой фазы, позволяющие рассматривать пенобетон как объект-систему. Особенности структурообразования и эксплуатации ячеистых бетонов обосновывают целесообразность представления их в виде открытых, динамических, самоорганизующихся систем [6].

Высокая пористость ячеистого бетона обеспечивает хорошие теплоизолирующие свойства. Это качество предопределяет его функциональное предназначение в строительстве. Из ячеистого бетона изготавливают в ос-

новном стеновые конструкции. Особенности технологии пенобетона позволяют его использовать для наливных полов, утеплять кровли, заполнять различные полости (катакомбы, рвы, тоннели и пр.). Длительность функционирования системы (материала, конструкции) зависит от условий эксплуатации. Эти условия, в свою очередь, определяют строительно-эксплуатационные свойства, подлежащие контролю. Для ячеистых бетонов – это средняя плотность, прочность, коэффициент теплопроводности, отпускная влажность и усадка.

Выбор модельного представления, изучаемого процесса или материала в целом определялся из условий решения той или иной задачи. При изучении процессов структурообразования материалов плотной или макропористой структуры, а также характера структуры этих материалов авторы исходили из условий целостности объекта в условиях его дискретного строения. Для решения задач определения влияния рецептурно-технологических факторов на физико-механические свойства, оптимизации составов была принята модель сплошной среды. Вид моделей изучаемой системы определяет соответствующие методы исследований.

Оптимизация действий систем техногенного происхождения по достижению цели заключается в создании системы с оптимальными параметрами и в умении рационально управлять ею в период эксплуатации. Создание строительных материалов начинается с выбора исходных сырьевых материалов с требуемым комплексом свойств и последующего подбора состава ингредиентов. Одновременно производится выбор способа изготовления продукции, контроля производства и качества на всех стадиях. Одним из определяющих этапов является технологический этап. Открытые самоорганизующиеся системы на стадии их зарождения весьма чувствительны к внешним воздействиям [7]. Ввиду этого на стадии формирования структур ячеистых бетонов целесообразно применять различные виды активации как сырьевых материалов, так и строительных растворов, являющихся важными регуляторами свойств готового материала.

На заключительной стадии на основании экспериментальных исследований выполнялась оптимизация рецептурно-технологических условий производства. Апробация исследований производилась путем изготовления опытно-производственных партий пенобетонных изделий.

При изучении процесса структурообразования и характера структур композиционных строительных материалов были применены различные виды моделей.

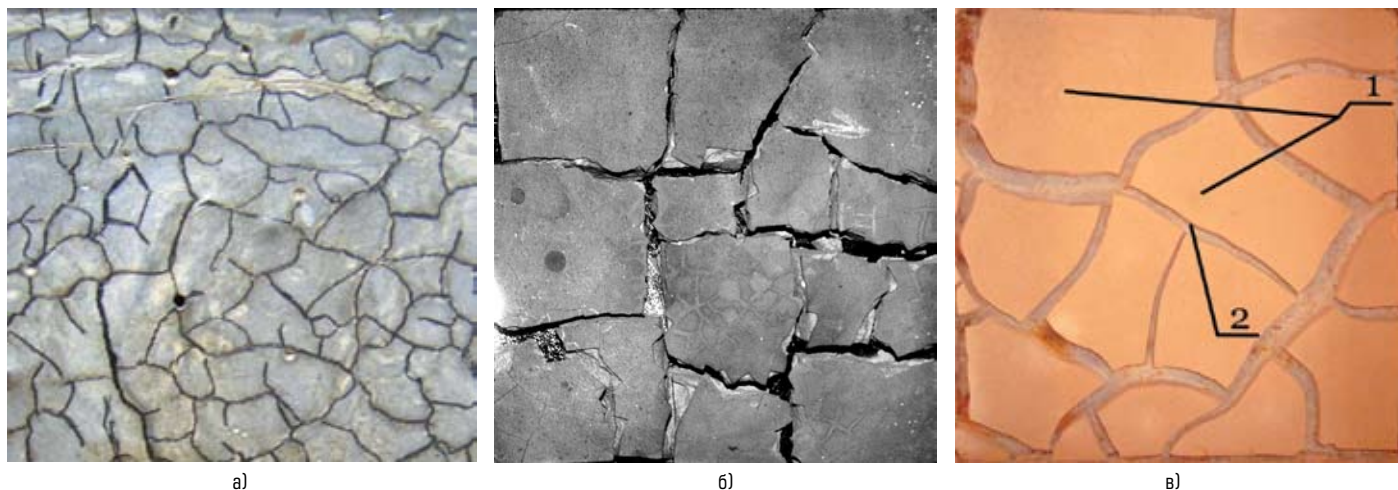


Рис. 1. Визуализация структур: а) цементный камень, б) характер разрушения цементного камня, в) физическая модель структуры цементного камня; 1 – структурный элемент, 2 – внутренняя поверхность раздела

На рис. 1а изображена структура цементного камня. Подобный характер структур наблюдается у всех объектов, образование которых сопровождается начальным уменьшением объема системы. При изучении характера структур моделей композиционных строительных материалов был применен метод аналогий. На рис. 1в приведен общий вид физической модели цементного камня. Модель была изготовлена из водоглиняной суспензии. Объемные изменения в модели происходили за счет удаления влаги при высыхании в условиях окружающей среды. Визуализация структуры позволила четко выделить элементы структуры. К ним отнесены частицы твердой фазы (рис. 1в – 1) и внутренние поверхности раздела (ВПР) (рис. 1в – 2). Внутренние поверхности раздела являются активными элементами структуры цементного камня, поскольку обеспечивают его целостность как объекта. С другой стороны, они являются наиболее слабыми звеньями, так как разрушение происходит как раз по ВПР. Этот процесс зафиксирован на рис. 1б, где показан характер разрушения образца цементного камня, подверженного многократным температурным воздействиям. Для разрушения объекта требуется затратить определенное количество энергии. Количество энергии будет пропорционально геометрическим характеристикам внутренних поверхностей раздела (общая протяженность, площадь, объем). Структурные элементы твердой фазы и ВПР являются взаимозависимой диалектической парой. От размера структурных элементов и их конфигурации зависит геометрия внутренних поверхностей раздела. Таким образом, свойства цементного камня должны коррелировать с геометрией ВПР.

Ввиду того что в пенобетоне в качестве вяжущего используется преимущественно портландцемент, следовательно, в межпоровых перегородках при их затвердевании будут происходить те же процессы, что и в затвердевающем цементном камне с образованием таких же элементов структуры. Однако ввиду малой толщины межпоровых перегородок визуализация их в ячеистом бетоне практически невозможна, что ставит новые задачи физического моделирования. На рис. 2 показан общий вид физической

модели материала макропористой структуры. На модели четко видны образовавшиеся в межпоровом пространстве в результате уменьшений объема матрицы структурные элементы и внутренние поверхности раздела.

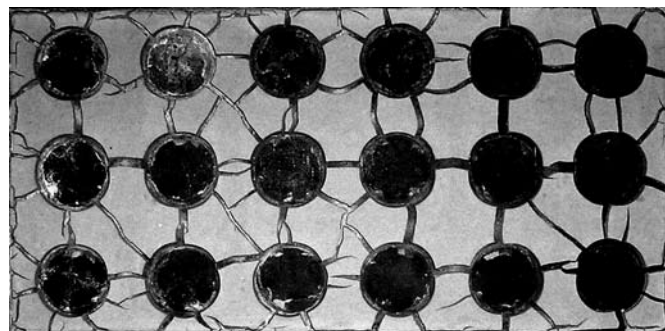


Рис. 2. Вид физической модели материала макропористой структуры

Образовавшиеся структуры фиксируются цифровой видеокамерой. Оцифрованные снимки подвергаются компьютерной обработке для количественного описания структурных параметров. Это дает возможным просчитать количество структурных элементов, их размеры, распределение по размерам. Для внутренних поверхностей раздела – протяженность, площадь и среднеарифметическую ширину. Этот метод был использован при определении влияния водосодержания (водотвердого отношения), характера ориентирования пор, их размера и формы на изменение вышеперечисленных характеристик структуры [8].

С развитием компьютерной техники начало широко применяться компьютерное моделирование. В процессе решения задачи о моделировании силовых полей в модели материала макропористой структуры была выдвинута гипотеза о тождественности силовых полей различного происхождения. Воздушные включения в пенобетонной смеси представляют собой сферу, окруженную водной пленкой, которая удерживается за счет мономолекулярного слоя поверхностно-активного вещества, молекулы которого строго ориентированы по отношению к водной среде. Исходя из этого воздушные включения были представлены как заряженные частицы с одноименными зарядами. Для

моделирования силовых линий и полей применен закон Кулона. Для построения силовых линий использовалась формула:  $E = (q/R^2)$ . Для построения силовых полей использовалась формула:  $F = (q/R)$ . Принцип суперпозиции определяет силовые линии и поля:

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n \text{ и } F = F_1 + F_2 + \dots + F_n$$

Силовые линии поля связаны между собой:  $E = -\text{grad } F$ .

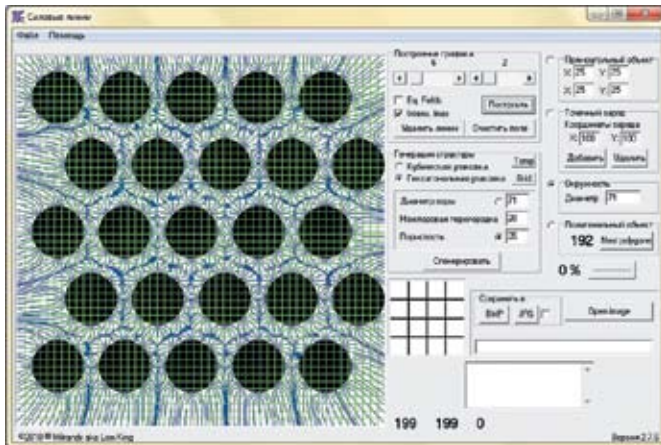


Рис. 3. Фрагмент компьютерной программы для построения силовых линий

Разработанная компьютерная программа позволила получить виртуальные модели с аналогичными физическим моделям параметрами. Как видно на рис. 4, расположение внутренних поверхностей раздела на физической и компьютерной моделях идентично. Таким образом, можно сделать вывод, что компьютерная модель в достаточной мере передает реальную картину формирования внутренних поверхностей раздела.

Разработанное программное обеспечение позволяет также произвести количественную оценку характера струк-

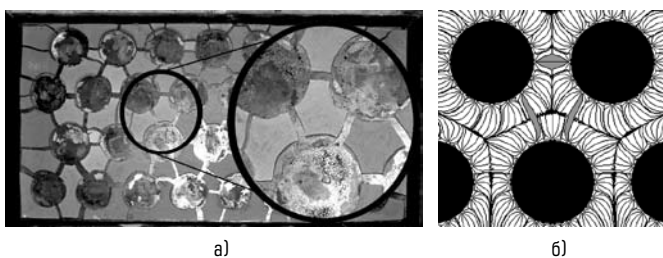


Рис. 4. Сравнение физической и компьютерной моделей:  
а) физическая модель; б) компьютерная модель

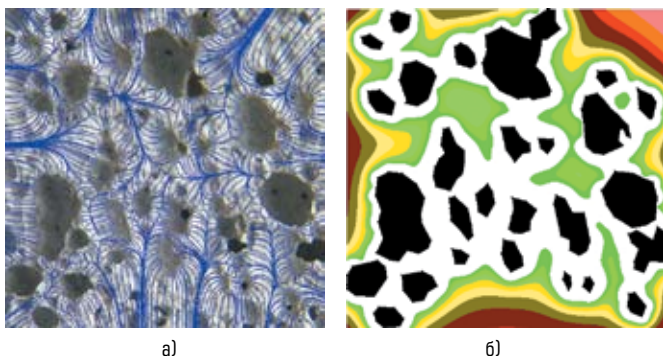


Рис. 5. Компьютерная обработка образцов пенобетона: а) распределение силовых линий в межпоровом пространстве, б) эквипотенциальные поля

туры реального материала через показатель суммарной напряженности межпорового пространства.

На рис. 5а изображено расположение силовых линий на реальной фотографии поверхности образца пенобетона, на рис. 5б – распределение эквипотенциальных полей в этой же структуре. На основании эквипотенциального поля рассчитывается его напряженность  $F_i$ . Программой также предусмотрен расчет фрактальной размерности.

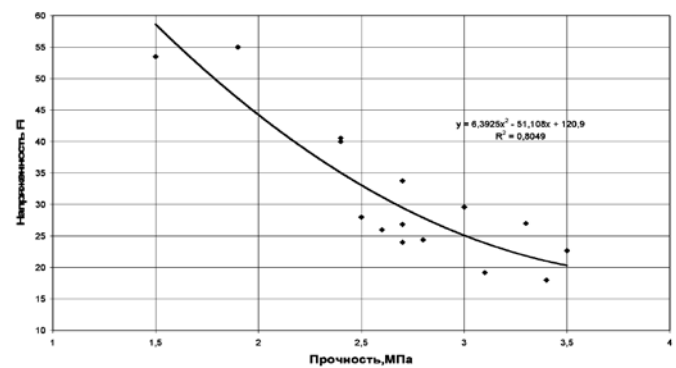


Рис. 6. Корреляционная зависимость

В заключение приводится апробация работоспособности разработанного программного обеспечения. По результатам трехфакторного эксперимента построена корреляционная зависимость между прочностью пенобетона марки D600 и предположительным понятием напряженности. Учитывая даже то, что метод испытания на прочность образцов при их разрушении не чувствителен к характеру структуры материала, тем не менее, степень корреляции между прочностью и напряженностью достаточно высока.

#### Выводы:

Предложенные методики при их дальнейшем усовершенствовании могут быть применены для ускоренного прогнозирования свойств ячеистых бетонов, а также для синтеза искусственных строительных композитов с прогнозируемыми структурой и свойствами.

#### Библиографический список

- Берталанфи Л. Общая теория систем: Обзор проблем и результатов // Системные исследования: Ежегодник. – М.: Наука, 1969, с. 30-54.
- Садовский В.Н. Общая теория систем: Задачи и методы построения / Всесоюзное совещание по теории систем. – М.: 1971, с. 126-129.
- Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. – М.: Изд. «Синтез», 2000, с. 519.
- Могилевский В.Д. Методология систем. Вербальный подход. – М.: Экономика, 1999, с. 251.
- Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных материалов / Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, А.А. Устенко. – М.: Стройиздат, 1980, с. 396.
- Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г., Композиционные строительные материалы и конструкции: структура, самоорганизация, свойства. – Одесса. ТЕС, 2010, с. 168.
- Николис Г., Пригожин И., Самоорганизация в неравновесных системах. Пер. с англ. – М.: 1979.
- Мартынов В.И., Выровой В.Н., Орлов Д.А. Анализ структурообразования и свойств неавтоклавно пенобетона. – М.: Строительные материалы. № 1, 2005, с. 48-49.