

Савенков Андрей Иванович,

к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: savenkov_andrey@mail.ru

Горбач Павел Сергеевич,

к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: gorbachps@mail.ru

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ МАТРИЦЫ ПЕНОБЕТОНА С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ ФРАКТАЛЬНОЙ ПЕРКОЛЯЦИИ

Savenkov A.I., Gorbach P.S.

STRUCTURE FORMATION OF FOAM CONCRETE MATRIX FROM THE POINT OF VIEW OF FRACTAL PERCOLATION THEORY

Аннотация. Данная работа предлагает современный подход к пониманию процесса схватывания пеноцементной смеси через призму теории перколяционных фрактальных моделей. Рассматриваются различные методы формирования структуры пористых веществ, среди которых выделяются эффективные методики агрегативного роста, ограниченного диффузионными факторами (DLA) и химическими реакциями (RLA, DLCA). Именно эти подходы демонстрируют высокую эффективность при изучении и создании моделей высокоразвитых пористых материалов. Образование цементного геля происходит вследствие постепенной агломерации отдельных фрагментов цементного коллоида, формирующих устойчивые фрактальные кластеры. Когда сформированные кластеры сливаются воедино и заполняют весь объем раствора, наблюдается качественный скачок – фазовый переход второго рода с образованием твердого тела.

Ключевые слова: Пенобетон, матрица пенобетона, схватывание раствора, перколяция, фрактал.

Abstract. This work offers a modern approach to understanding the setting process of a foam-cement mixture through the prism of the theory of percolation fractal models. Various methods of forming the structure of porous substances are considered, among which effective methods of aggregative growth limited by diffusion factors (DLA) and chemical reactions (RLA, DLCA) are distinguished. It is these approaches that demonstrate high efficiency in the study and creation of models of highly developed porous materials. The formation of a cement gel occurs due to the gradual agglomeration of individual fragments of the cement colloid, forming stable fractal clusters. As the process progresses, the number of free particles decreases, and the number of interconnected fragments increases, creating the basis of a solid body. When the formed clusters merge together and fill the entire volume of the solution, a qualitative leap is observed – a phase transition of the second kind with the formation of a solid.

Keywords: Foam concrete, foam concrete matrix, mortar setting, percolation, fractal.

Пенобетон представляет собой многофункциональный строительный материал, объединяющий в себе целый ряд достоинств: отличается доступной стоимостью, высокой эффективностью, надежностью, экологической чистотой и стойкостью к агрессивному химическому и биологическому влиянию. С точки зрения экологии пенобетон сопоставим с древесиной, однако обладает несгораемостью и длительным эксплуатационным ресурсом.

Этот материал широко используется в строительстве. Он представляет

собой затвердевшую пену, которая образуется из жидкой дисперсной коллоидной системы. В такой системе цементный раствор является «каркасом» - несущим основанием, а дисперсной фазой – газ, который вовлекается в структуру с помощью поверхностно-активного вещества [1, 2].

В связи с тем, что пенобетон является сложной системой, состоящей из множества компонентов, для обеспечения его высокого качества необходимо учитывать большое количество параметров, которые влияют на его физико-механические характеристики и товарное качество произведенного продукта (рисунок 1).

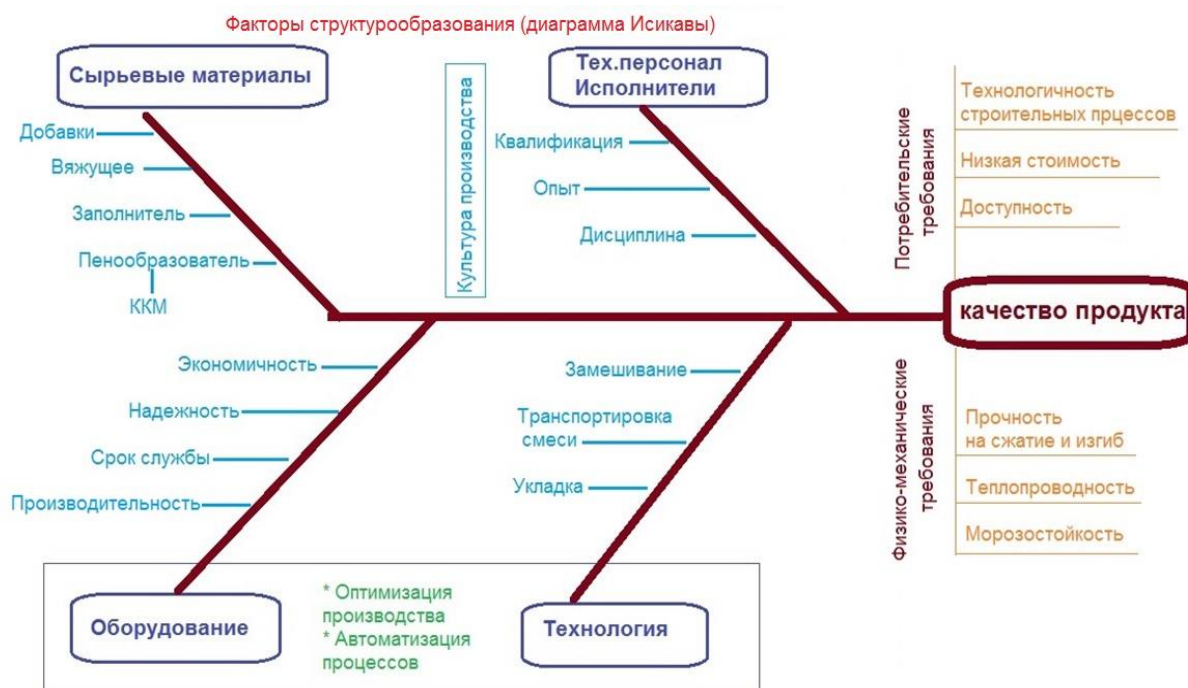


Рисунок 1 – Факторы структурообразования и качества пенобетона

Пенобетон, благодаря небольшому удельному весу и низкому коэффициенту теплопроводности, применяется как строительный материал, частично выполняющий одновременно конструктивные функции и обеспечивающий теплоизоляцию зданий. Тем не менее, относительно невысокая прочность по сравнению с традиционным тяжелым бетоном ограничивает области его практического применения, поскольку именно показатель прочности служит основным критерием выбора материала для конкретных строительных конструкций. Ключевую роль в производстве пенобетона играет технологический этап превращения пены-коллоида в твердый продукт [2].

Основной задачей данного исследования является рассмотрение и сравнительный анализ различных подходов российских и зарубежных ученых к моделированию процесса структурообразования пенобетона – преобразования жидкого коллоидного состояния смеси в твердое вещество.

Формирование трехмерной сетчато-ячеистой структуры, состоящей из

воздушного пузырькового каркаса внутри цементного камня, оказывает решающее влияние на конечные свойства изделия (прочностные характеристики, теплопередачу и долговечность). Внутренняя структура с воздушными полостями определяет качества, делающие пенобетон популярным строительным материалом [1]. Легкие бетоны плотностью до 1000 кг/м^3 становятся стандартом в современном строительстве, где востребованы теплоэффективность и снижение нагрузки на фундамент. Однако их сложный состав требует особого подхода к технологии.

Теория фрактальной перколяции позволяет описать и объяснить образование сложных сетей и поровых структур в материале. Она рассматривает процесс формирования связности в случайных системах и помогает предсказывать поведение материала на макроуровне исходя из характеристик микроструктуры. Применение фрактальных моделей к строительным материалам позволяет лучше понимать механизмы распространения схватывания цементного камня матрицы [3].

Перколяция – это явление перехода от разрозненных элементов к созданию сплошной взаимосвязанной системы внутри среды. Она играет ключевую роль в понимании процессов формирования прочности и электропроводности различных веществ. Так, структура пенобетона с наличием поровых каналов оказывает значительное влияние на распределение нагрузок и возникновение механических повреждений. Концентрация гелевых частиц, при достижении которой возникает перколяционный эффект, известна как порог перколяции. Данный показатель является важным критерием оптимизации условий изготовления материалов с требуемыми характеристиками.

Создание структуры пенобетона проходит несколько стадий: приготовление смеси (цементное тесто насыщается воздухом либо газообразующим агентом, образуя вспененную структуру); затвердевание и гидратация цементного раствора (химические реакции приводят к постепенному твердению и формированию прочного каркасного основания); формирование структуры межпоровых перегородок (образуются пустоты различного диаметра и конфигурации, существенно влияющие на итоговые свойства материала).

На всех этапах важную роль играют взаимодействия между жидкими компонентами, воздушными включениями и твердыми частицами. Использование теории фрактальной перколяции дает возможность моделировать эти процессы путем анализа вероятностных связей между отдельными элементами и оценки уровня развитости пористой сети [3].

В дисперсных системах частицы подвергаются воздействию двух ключевых факторов: молекулярное притяжение (силы Ван-дер-Ваальса), связанное с силами межмолекулярного взаимодействия, и электростатическое отталкивание, возникающее благодаря наличию электрических зарядов на поверхностях частиц. Равновесие между этими двумя видами взаимодействий влияет на

устойчивость всей системы и вероятность образования агрегатов либо противодействие этому процессу.

Ключевым физическим и химическим принципом, лежащим в основе взаимодействий между веществами, выступает процесс диффузии. Различные модели, построенные на изучении данного типа взаимодействия, получили название диффузионных моделей. В рамках такой модели точный расчет осуществляется путем описания способа формирования заданной структуры через объединение (соединение) отдельных частиц, движущихся хаотично согласно законам диффузии. Образованная таким образом структура носит наименование фрактального кластера. Диффузионные процессы моделируются по типу взаимодействия – либо как взаимодействие «кластер-частица», либо как взаимодействие «кластер-кластер». Известны модели DLA и DLCA.

Модель Виттена-Сандера (DLA), известная как агрегация, ограниченная диффузией, представляет собой метод численного моделирования, используемый для изучения процессов образования случайных фрактальных структур, таких как дендримероподобные объекты. Согласно данной модели, частицы хаотично движутся по пространству согласно броуновскому механизму до тех пор, пока не сталкиваются с зарождающейся системой. После столкновения частица прикрепляется к структуре, увеличивая ее размер. Повторение данного процесса многократно формирует сложную ветвящуюся систему, имеющую характерные фрактальные свойства. Среди примеров природных явлений, аналогичных этому процессу, можно назвать формирование кристаллов льда (снежинок) и галактик. Модель Виттена-Сандера является одной из первых и наиболее известных среди моделей диффузионного роста, в которой создание фрактальной формы происходит путем постепенного присоединения свободных частиц к центральному объекту.

Модель DLCA (Diffusion-Limited Cluster-Cluster Aggregation) принадлежит семейству сложных кластерных моделей и применяется для описания процесса возникновения фрактально организованных агрегатов, образующихся при слипании небольших подвижных скоплений (кластеров), осуществляющих броуновское движение. Эти агрегаты демонстрируют выраженную фрактальность, аналогичную многим природным объектам и явлениям [4]. Моделирование необратимой агрегации твердых сфер методом DLCA проводилось с применением метода броуновской динамики. Отдельные элементы были способны свободно перемещаться внутри определенных границ, однако распад связи запрещен. До начала стадии гелеобразования исследовались структура и размеры образовавшихся кластеров.

Компьютерное моделирование позволяет лучше понять процессы образования структур материалов. В условиях низкой плотности формирующиеся кластеры обладают фрактальной размерностью около 1,8 вне зависимости от условий роста. Локальное строение среды имеет тенденцию принимать тетра-

эдрическую конфигурацию и демонстрирует заметную упорядоченность, сохраняющуюся вплоть до объемной доли компонентов меньше 0,1. По мере повышения плотности материала четкость этой структуры постепенно снижается. Общая направленность эволюции системы заключается в стремлении сформировать наибольшее количество стабильных межчастичных контактов, минимизируя вероятность разрыва связей. Первоначальный этап развития сопровождается быстрым ростом числа образующихся соединений, однако впоследствии скорость этого процесса существенно уменьшается [4].

Алгоритм моделирования лучше всего использовать для оперативного построения крупных пористых структур, когда подробности процесса слияния частиц несущественны. Некоторые из них оптимальны там, где нужно целенаправленно управлять формой и разветвленностью пористой среды, одновременно поддерживая нужную степень пористости. Подходящий метод выбирается исходя из исследовательских задач и имеющихся мощностей компьютера.

Фрактальная теория перколяции открывает новые возможности для анализа и улучшения структуры пенобетонных изделий. Понимание механизмов формирования сетчато-пористого каркаса позволяет создавать строительные материалы с улучшенными техническими характеристиками. Дальнейшие работы в области фрактального подхода помогут внедрить передовые технологии производства и повысить качество строительной продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Моргун, Л.В.** Пенобетон / Моргун Л.В. Монография - Ростов-на-Дону: изд-во РГСУ, 2012.
2. **Савенков, А.И.** Оценка прочности пенобетона при осевом одноосном сжатии / А.И. Савенков, П.А. Шустов, П.С. Горбач, А.О. Плосконосова – Текст : непосредственный // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 1 (32). С. 100-107.
3. **Меньшутина, Н.В.** Сравнение алгоритмов DLA и RLA при моделировании пористых структур / Н.В. Меньшутина, С.И. Иванов, И.В. Лебедев, А.Ю. Тыртышников – Текст : непосредственный // Программные продукты и системы №4(30) 2017. с.758-764.
4. **Babu S.** Diffusion limited cluster aggregation with irreversible slippery bonds / S. Babu, J.C. Gimel and T. Nicolai. // The European Physical Journal. E 27, 2008. p. 297–308.
5. **Коротченко, Е.В.** Компьютерное моделирование диффузионных процессов в прикладных задачах/ Е.В. Коротченко Учебное пособие - СПб: Изд-во СПбГУ. 2017.