

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ СТРУКТУР, ОБРАЗОВАННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ КАПИЛЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ

**Рустамов Эркин Тохирович**

*Узбекистан Азиатский международный университет  
кафедры Общетеchnические дисциплины*

**Аннотация:** *Основной целью компьютерного моделирования упаковок дискретных сред является получение статистически адекватных закономерностей, численно описывающих процесс структурообразования реальных сыпучих материалов. Следовательно, для построения компьютерной модели дискретной среды необходимо знать морфологические и размерные параметры частиц, из которых состоит дискретная среда.*

*Как оговаривалось в подразделе «Основные сведения о дисперсных системах», приведенные алгоритмы ориентированы на структурно-имитационное моделирование упаковок идеализированных свободно дисперсных систем с твердой дисперсной фазой и газообразной дисперсионной средой. Данные модели позволяют судить лишь о геометрической конфигурации хаотичных структур, состоящих из тел правильной формы (как правило, рассматриваются эквивалентные сферы) без учета ряда факторов, характерных для реальных гранулированных материалов. К числу таких факторов относится присутствие практически в любом материале, находящемся в естественном состоянии, третьей фазовой составляющей – влаги.*

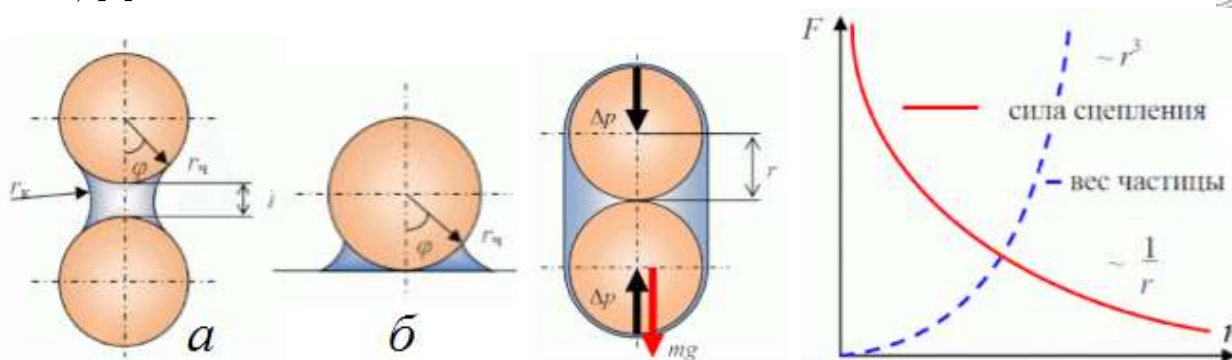
**Ключевые слова:** *дисперс, система, алгоритмы, структурно-имитационное, моделирование, твердой, фаза, газообразной, эквивалентные, сферы, гранулированных материалов, влаги.*

В пространстве и во времени структура любого материала непрерывно претерпевает изменения, этому, в частности, способствуют постоянное движение элементарных частиц, атомов, молекул, взаимодействие материала с окружающей средой. К примеру, почти все строительные материалы и их сырьевые смеси, по крайней мере, на микроуровне, представляют собой микрогетерогенные дисперсные системы, состоящие нескольких фаз, к числу которых относится жидкая составляющая. Характер структуры таких систем во многом определяется характером и величиной связей или сил сцепления между структурными элементами (микрочастицами, зёрнами и т.д.). В зависимости от характера этих связей в дисперсных системах выделяют прочные фазовые контакты в конденсационных (срашивание за счет химических взаимодействий аморфных частиц) или кристаллизационных (срашивание за счет химических взаимодействий частиц в виде

кристаллов) структурах дисперсных материалов, непосредственные атомные контакты в сухих порошках и сравнительно слабые силы молекулярного взаимодействия (Ван-дер-Ваальсовы), действующие между частицами через прослойки жидкой фазы, в коагуляционных структурах. Особенность структур второго и третьего видов – полная их обратимость по прочности. Конденсационные и особенно кристаллизационные структуры придают веществу повышенную прочность, хрупкость. Во многих случаях возможно сосуществование всех указанных видов структур. Например, при затворении цемента водой атомные (непосредственные) контакты переходят в коагуляционных, затем в фазовые. Этому переходу соответствует непрерывное изменение вязкости, модуля упругости и, главное, прочности дисперсных структур.

Помимо рассмотренных выше видов взаимодействий и соответствующих структур необходимо выделить такие важные взаимодействия, как капиллярные, проявляющиеся в трехфазных (твердое – жидкость – газ) дисперсных системах, к которым относится, к примеру, большинство сырьевых (бетонных, растворных, силикатных и т.п.) смесей для изготовления строительных композиционных материалов.

На рисунке 1 показано искривление жидкости в зазоре между двумя частицами сферической формы радиуса  $r_c$ , а также между сферической частицей и плоскостью, приводящее к их стягиванию в результате растяжения жидкости и появления в ней отрицательного капиллярного давления (основная составляющая силы капиллярного сцепления) [1].



**Рисунок 1** – Образование капиллярного мениска: между двумя сферическими частицами (а); между сферической частицей и плоскостью, (б) Схема капиллярного сцепления двух шарообразных песчинок, с) Зависимость силы поверхностного натяжения от радиуса частиц.

Со стороны искривленной поверхности жидкости действует сила, направленная внутрь, к центру кривизны. Она создает дополнительное давление, величина которого определяется формулой Лапласа:

$$\Delta p^+ = 2\sigma / r_k, \tag{1}$$



где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости,  $r_k$  – радиус кривизны ее поверхности.

Например, для частиц песка сила «склеивания» рассчитывается следующим образом. Для простоты будем считать частичку шариком диаметром 300 микрон или  $3 \cdot 10^{-2}$  см. Когда соприкасаются две песчинки, окружающие их водяные пленки сливаются, образуя нечто вроде цилиндра с донцами радиуса  $r$  (рисунок 2). Коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma = 72,5$  дин/см. Подставив эти данные в формулу Лапласа, получаем величину избыточного давления, сжимающего песчинки:

$$\Delta p^+ = 2 \cdot 72,5 / (1,5 \cdot 10^{-2}) \approx 10000 \text{ дин} / \text{см}^2,$$

Вес песчинки создает «противодавление», усилие, которое растягивает пленку воды и отрывает песчинки друг от друга. Этот вес  $p = mg = (4/3)\pi r^3 \rho g$ , где  $\rho$  – плотность материала,  $g$  – ускорение силы тяжести. Он приложен к площади  $S = \pi r^2$ . Отсюда растягивающее давление:

$$\Delta p^- = p / s = (4/3) \cdot r \rho g, \quad (2)$$

Подставив плотность кварца  $2,4 \text{ Г} / \text{см}^3$ ,  $g \approx 10^3 \text{ см} / \text{с}^2$ , получим  $\Delta p^- \approx 50 \text{ дин} / \text{см}^2$ .

Сила, «склеивающая» песчинки, в 200 раз больше силы, их разрывающей. При уменьшении радиуса  $r$  частиц это соотношение очень резко возрастает: вес частицы падает пропорционально  $r^3$ , а сила сцепления растет линейно (рисунок 3). Чем меньше размеры частиц, тем сильнее они слипаются одна с другой и прилипают к различным поверхностям.

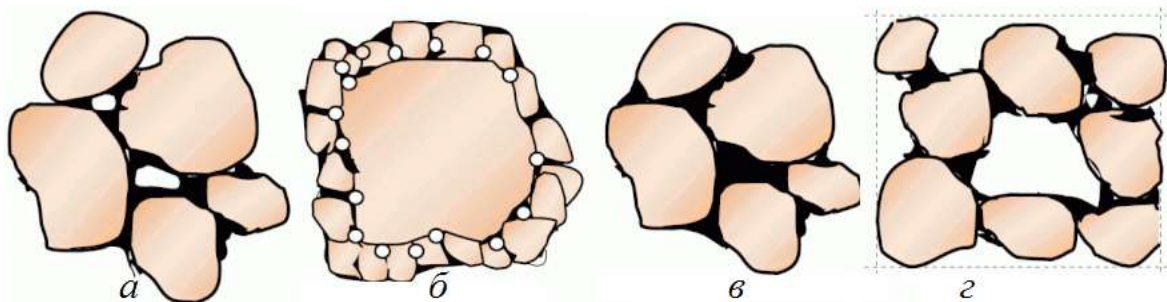
У крупных песчинок есть некий «критический размер», после превышения которого силы поверхностного натяжения перестают держать их вес. Его несложно отыскать, приравняв силы давления и растяжения  $\Delta p^+ = \Delta p^-$ , и подставив численные данные. Расчеты дают значение «критического» радиуса частицы примерно 0,6 мм [2].

Преобладание капиллярных сил над другими составляющими меж частичного взаимодействия особенно заметно для частиц размером более 10 мкм и вплоть до 1-2 мм. Именно действием сил капиллярного сцепления объясняются экстремальные зависимости насыпного объема, уплотняемой сырьевых смесей, а также прочности свежесформованных композитных изделий. Капиллярное сцепление проявляется также в капиллярно-пористых телах, структурные элементы которых в основном соединены другими связями некапиллярного характера. В этих телах силы капиллярного сцепления создают внутренние напряжения, вызывающие усадочные деформации, а также влияют на прочность материала.

Подобно тому, как образуются конденсационные или коагуляционных структуры, под действием сил капиллярного сцепления возникают капиллярные

структуры (рисунок 4), которые затем накладывают свой отпечаток на строение и свойства материалов, полученных из таких систем.

В полидисперсных трехфазных системах появление капиллярных менисков и возникновение сил капиллярного сцепления между тонкодисперсными и грубодисперсными частицами приводит к прилипанию тонкодисперсных частиц к грубодисперсным с образованием агрегатов-глобул. К примеру, в сырьевых смесях для производства строительных композиционных материалов, в результате процессов капиллярного структурообразования и наиболее важного из них – глобулирования, концентрация вяжущего вещества у поверхности заполнителей и в контактных зонах между ними выше средней концентрации в смеси. В этом одна из причин увеличения прочности и плотности материалов в указанных зонах. Более полное использование гидратационной и связующей активности вяжущего в прессованных строительных композитах (силикатный и бетонный кирпич полусухого прессования и т.п.) достигается на стадии приготовления сырьевых смесей при влажности, соответствующей их максимальному глобулированию. В этом случае жидкая фаза играет роль усиливающего компонента, упрочняя материал за счет перевода матричного цементирующего вещества из объемного состояния в пленочное с более высокими прочностью и структурированностью.

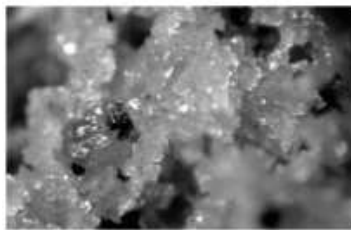


**Рисунок 4** – Капиллярные структуры в дисперсных системах: а – трехфазная гранула; б – трехфазная глобула; в – двухфазная гранула; г – ячеисто-глобулярная структура.

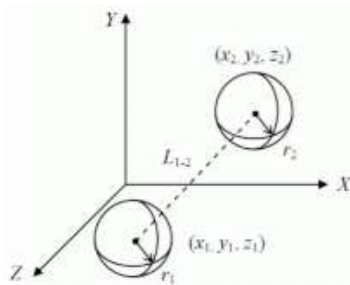
Если для дисперсных систем и материалов определяющими являются контактные взаимодействия, характер и величина которых обуславливают соответствующий тип структуры (эффект поверхностей), то для грубозернистых систем наибольшее значение имеют закономерности укладки в зависимости от размеров и формы зерен (эффект масс) [1].

На рисунке 5 приведен макроснимок увлажненного кварцевого песка. Влажность системы составляет порядка 5-6 % по массе. На снимке видно капиллярное взаимодействие мелких частиц песка с крупными. «Прилипшие» частички образуют агрегаты-глобулы, которые в свою очередь строят «арочные» структуры.

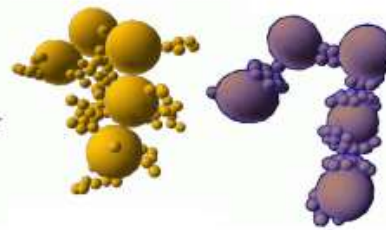




**Рисунок 5 –** Макроснимок увлажненного кварцевого песка



**Рисунок 6 – К** определению расстояния между объектами



**Рисунок 7 –** Процесс моделирования ячеисто-глобулярной структуры

Сформулируем алгоритм построения компьютерной структурно-имитационной модели объемной ячеисто-глобулярной структуры. Для реализации алгоритма используем язык программирования Blitz Basic с возможностью трехмерной визуализации. Основой алгоритма послужит условие, исключающее пересечение поверхностей объектов в трехмерном пространстве.

Порядок построения модели заключается в следующем.

1. В бесконечном трехмерном пространстве создается объект сфера, имеющая координаты  $x = 0, y = 0, z = 0$ .

2. Вблизи поверхности случайно выбранной существующей частицы создается  $i$ -ая сферическая частица. Координаты новой сферической частицы задаются случайными. Таким образом, строится трехмерная цепочечная структура из сферических частиц. Создание новой частицы возможно только при отсутствии пересечения поверхностей частиц. Для этого рассчитываются расстояния между центрами сфер (рисунок 6). Для двух трехмерных тел с координатами  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$ , расстояние  $L_{1-2}$  между их центрами определяется по формуле:

$$L_{1-2} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}, \quad (3)$$

### Заключение:

Существует множество разнообразных программных пакетов CFD-моделирования. Можно отметить такие широко применяемые программные комплексы, как ANSYS Fluent, Autodesk Simulation CFD, Pushbutton CFD и другие продукты. К примеру, посредством моделирования с использованием CFD-пакетов на сегодняшний день гоночными командами производится анализ и оптимизация весьма сложных потоков воздуха, образующихся на переднем и заднем спойлере

современных гоночных автомобилей Формулы-1. Безупречная и эффективная работа будь то гоночного автомобиля Формулы-1, воздухоочистителя или индукционного улавливающего кожуха зависит от потоков воздуха, циркулирующих внутри устройства и в окружающем его пространстве. Моделирование с использованием CFD благодаря заложенным в них физическим и математическим моделям позволяет воспроизвести эти невидимые, но весьма важные и сложные процессы. Самое большое преимущество моделирования с использованием CFD по сравнению с другими экспериментальными методами и измерениями заключается в том, что определяются не только значения в выборочных точках, но и одновременно регистрируется совокупность всех физических величин, и тем самым появляется возможность удостовериться в правильности функционирования модели.

Более детально мы остановимся на компьютерной реконструкции дискретных сред, в частности на структурно-имитационном моделировании упаковок частиц гранулированных материалов, представляющих особый интерес при решении многих рецептурно-технологических задач.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ:

[1] – Белов В.В. Капиллярное структурообразование сырьевых композиций на основе минеральных вяжущих веществ. – «ALIFORM» Международное аналитическое обозрение, №6, 2010, С.63-75.

[2] – Шишлова, А. Песок сухой, влажный и звучащий. – Наука и жизнь, № 6, 1999.

[3] – Пальцер, У. Компьютерное моделирование в производстве бетонных изделий / У. Пальцер, Й.Г. Швабе // Бетон и Железобетон. 2010. 20-22.

[4] – Белова, О.В. Методологические основы CFD-расчетов для поддержки проектирования пневмогидравлических систем / О.В. Белова, В.Ю. Волков, А.П. Скибин, А.В. Николаева, А.А. Крутиков, А.В. Чернышев // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 5. С.1-13.

[5] – Козырев С.А. CFD метод в компьютерных технологиях как инструмент исследования аэродинамики глубоких карьеров / С.А. Козырев, В.Ф. Скороходов, Р.М. Никитин, П.В. Амосов, В.В. Массан // Труды горного института Кольского НЦ РАН. 2014. С.251-255.

[6] – Роул, А. Основные принципы анализа размеров частиц / А. Роул // Техническая аннотация Malvern Instruments Limited. 2009. 12 с.

[7] – Егорова, Е.В. Поверхностные явления и дисперсные системы: учеб. пособие / Е.В. Егорова, Ю.В. Поленов // Иван. гос.хим.-технол. ун-т.- Иваново, 2008. — 84 с.

[8] – Михеева, Е.В. Поверхностные явления и дисперсные системы. Коллоидная химия. Сборник примеров и задач / Е.В. Михеева, Н.П. Пикула, С.Н. Карбаинова //



учебное пособие для студентов ХТФ, ФТФ, ЭЭФ, ИГНД и ИДО. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 116 с.

[9] – Pabst, W. Characterization of particles and particle systems / W. Pabst, E. Gregorova // ICT Prague. 2007. 122 p.

[10] – Берлин, А.А. Имитация свойств твердых тел и жидкостей методами компьютерного моделирования / А.А. Берлин, Н.К. Балабаев // Физика. Сорский образовательный журнал. №11. 1997. с.85-92.

[11] – Binder, K., Heermann D.W. Monte Carlo Simulation in Statistical Physics / K. Binder, D.W. Heermann // An Introduction. London-NY.: Springer. 2010. 200 p.

[12] – Satoh, A. Introduction to Practice of Molecular Simulation: Molecular Dynamics, Monte Carlo, Brownian Dynamics, Lattice Boltzmann and Dissipative Particle Dynamics / A. Satoh // Elsevier, 2011. 322 p.

[13] – Пальцер, У. Компьютерное моделирование в производстве бетонных изделий / У. Пальцер, Й.Г. Швабе // Бетон и Железобетон. 2010. 20-22.

[14]–Харитонов, А.М. Структурно-имитационное моделирование в исследованиях свойств цементных композитов: автореф, дис, на соискание ученой степени доктора тех. наук (05.23.05 – Строительные материалы и изделия) / А.М. Харитонов; науч. консультант П.Г. Комохов. — С.-Петербург, 2009. — 38 с.

[15] – Дорофеевко, С.О. Численное моделирование течения бидисперсного сыпучего материала в реакторе шахтного типа / С.О. Дорофеевко // Теоретические основы химической технологии. 2007. Том 41. №6. С. 625-629.

[16] – Кучин, И.В. Моделирование процессов структурообразования в дисперсных системах / И.В. Кучин, Н.Б. Урьев // Журнал физической химии. 2007. Том 81. №3. с.421-425.

[17] – Bullard, J.W. The Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory Consortium / J.W. Bullard // Annual Report, January 2003, pp. 1-39.

[18] – Hu, J. Shape Characterization Of Concrete Aggregate / J. Hu, P. Stroeven. // Image Anal Stereol, 25, 2006; pp. 43-53.

[19] – Stroeven, P. Virtual Reality Studies of Concrete / P. Stroeven, L.J. Sluys, Z. Guo, M. Stroeven. // Forma, 21, 2006, pp. 227–242.

ЛИТЕРАТУРА.

1. TEKNOLOGIYA FANINI O ‘QITISHDA INTERFAOL USULLARNI QO ‘LLASH METODIKASI. BSI Qizi, RD Dilmurodovna, RE Tohirovich, P Norjona, Ta’lim fidoyilari 4 (1), 191-197

2. TYPICAL MISTAKES MADE BY STUDENTS WHEN MAKING DRAWINGS IN THE ENGINEERING GRAPHICS DISCIPLINE. RE Tohirovich, RD Dilmurodovna, E-Conference Globe, 339-343

3. KICHIK BIZNES SUB’EKTLARINI KREDITLASHNING XALQARO REYTINGLARDA O ‘RNI. MS Rustamov, M Dehqonov, Science and innovation 2 (Special Issue 13), 792-794

4. MAKTABGACHA TA’LIM MUASSASALARIDA MASHGULOTLARNI TASHKIL ETISH. RO Jaxonovna, RE Tohirovich, RD Dilmurodovna. BARQARORLIK VA YETAKCHI TADQIQOTLAR ONLAYN ILMIY JURNALI 2 (1), 321-327

[20] – Кондращенко, В.И. Интегрированный подход к решению задач строительного материаловедения / В.И. Кондращенко, Д.А. Гребенников, С.В. Гузенко, А.В. Кендюк // Мат-лы международного конгресса Наука и инновации в строительстве SIB-2008. Том 1. Современные проблемы строительного материаловедения и технологии. Книга 1 (А - Н). – Воронеж. 2008. 358 с. (С. 235-240).