

Николаюк-Ртищева М.В., Дереченник С.С.

## МЕТОДИКА ОБЪЕМНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ МОНОДИСПЕРСНОЙ СТРУКТУРЫ: ВЕРОЯТНОСТНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЧАСТИЦ В СКРЫТЫХ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ

**Введение.** Компьютерное моделирование открыло принципиально новые возможности в изучении строения неупорядоченных многочастичных систем, в частности микро- и мезоструктуры дисперсных материалов. Численные и имитационные модели эффективно дополняют классические физико-химические методы косвенного анализа и методы прямого наблюдения средствами оптической и электронной микроскопии [1]. Так, компьютерная модель может содержать данные о размерах, форме и координатах всех частиц некоторой сложной системы, т.е. необходимую и достаточную информацию для анализа взаимного расположения и взаимовлияния частиц с точки зрения коллективных явлений, определения структурных характеристик системы в целом, установления статистических закономерностей и т.п. Подобное моделирование направлено при этом не только на создание новых методик исследования и описания структуры исследуемых объектов, но и на возможность их конкретного практического применения. Одной из наиболее актуальных и практически значимых задач является исследование систем сложной структуры во взаимосвязи их объемных и плоских характеристик, а именно – реконструкции трехмерной структуры дисперсного материала по двумерным изображениям (например, срезам). Ранее нами был предложен оригинальный метод реконструкции гранулометрического состава дисперсных фаз, основанный на новом интегральном преобразовании распределения размера сечений дисперсных частиц в плоском срезе образца [2]. Гранулометрический состав является весьма важным структурным параметром, однако он характеризует дисперсную систему в целом и не позволяет судить о фактической структуре исследуемого образца материала. Единственным методом определения объемной структуры конкретного образца до сих пор остается исследование набора его послойных шлифов (срезов).

Исследования, выполненные в настоящей работе, имели целью выяснить взаимосвязь топологической структуры, наблюдаемой в конкретном плоском сечении модельного образца монодисперсного материала, с его фактической объемной структурой. Установленные вероятностные закономерности такой взаимосвязи позволяют частично реконструировать объемную структуру образца на некоторую глубину, в частности – локализовать положение некоторых частиц в скрытом приповерхностном слое.

**Получение базовых статистических зависимостей структурно-топологических свойств монодисперсной системы.** Объектом исследования являются модели неплотных (с коэффициентом упаковки  $\eta \leq 0.3$ ) монодисперсных систем, полученные внерешеточным методом случайной генерации сферических частиц одинакового радиуса  $R$  без их перекрытия [3]. Эффективным инструментом изучения подобных структур является метод Вороного-Делоне [4], исходными данными для которого служат список координат центров частиц и таблицы их соседства. На рисунке 1 а), б) приведены пример модели из 4320 частиц и соответствующее ей пространственное разбиение Вороного-Делоне. Выполним произвольный срез рассматриваемой модели плоскостью  $z = 0$ , в который попадают многоугольники сечения многогранников Вороного, а также некоторые сечения частиц в виде дисков различного радиуса  $r \leq R$ . На рисунке 1 в) представлена центральная область такого среза, выделенная для исключения влияния граничных эффектов моделирования. В этой области расположено 609 многоугольников сечения, 272 из них – с сечениями частиц.

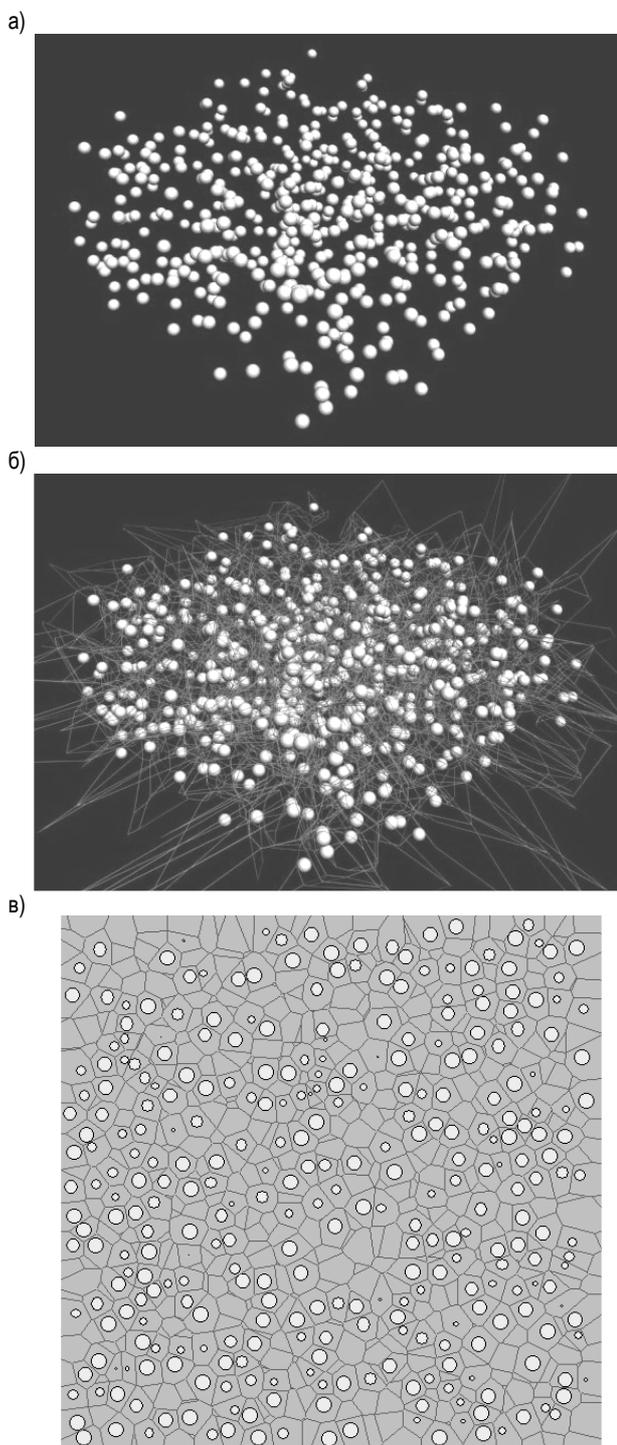


Рис. 1. Модель неплотной (коэффициент упаковки  $\eta = 0.15$ ) монодисперсной системы (а) и ее пространственное разбиение Вороного-Делоне (б); центральная область плоского среза системы с сечениями частиц и многогранников Вороного (в)

Николаюк-Ртищева М.В.,  
Беларусь,

**Таблица.** Статистика распределения по слоям дисперсной структуры незатененных частиц радиуса  $R$

| Коэффициент упаковки системы $\eta$ | Вероятность нахождения частицы на глубине $z$ от поверхности |                 |                  |                  |             |
|-------------------------------------|--|-----------------|------------------|------------------|-------------|
|                                     | во внешнем слое  | в скрытых слоях |                  |                  |             |
|                                     | $0 \leq z < R$   | $R \leq z < 2R$ | $2R \leq z < 3R$ | $3R \leq z < 4R$ | $z \geq 4R$ |
| 0.15                                | 0.468  | 0.423           | 0.108            | 0.001            | 0           |
| 0.20                                | 0.505  | 0.457           | 0.038            | 0                | 0           |
| 0.30                                | 0.621  | 0.377           | 0.002            | 0                | 0           |

Начальными данными для статистической обработки явились:

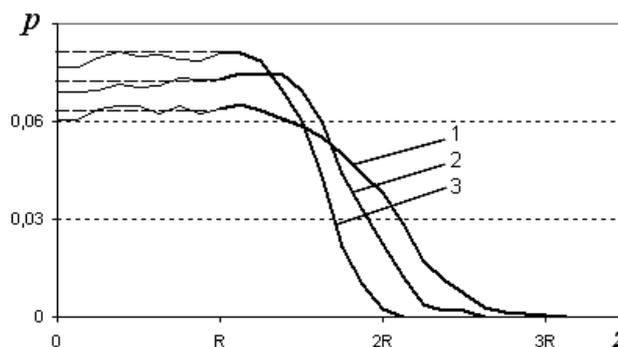
- координаты  $Z_i$  центров частиц, многогранники Вороного которых попали в срез;
- площадь  $S_i$  каждого многоугольника – сечения многогранника Вороного (внутри многоугольника может находиться сечение соответствующей  $i$ -й частицы радиуса  $r_i \leq R$ ; либо такого сечения нет, если  $|z_i| \geq R$ ).

Данные, непосредственно получаемые из изображения среза, содержат некоторую информацию о местоположении частиц в образце по обе стороны секущей плоскости, т.е. в обоих полупространствах системы – нижнем (оставшейся после среза части образца), и верхнем (удаленной части). Разделим образец на плоскопараллельные слои толщиной  $R$  каждый, определив принадлежность частицы конкретному слою координатой ее центра. В нижнем полупространстве получим: внешний поверхностный слой, для которого  $0 \leq z < R$ , а также внутренние (скрытые) слои с  $R \leq z < 2R$ ,  $2R \leq z < 3R$  и  $3R \leq z < 4R$ . Область образца, начиная с величины  $z \geq 4R$ , будем считать глубинной. Значения  $z < 0$  симметрично соответствуют аналогичным слоям верхнего полупространства (так, например, половина сечений, имеющих в плоскости среза, получена от частиц поверхностного слоя удаленной части образца).

Итак, все частицы обоих поверхностных слоев закономерно попадают в плоскость среза вместе с соответствующими им многогранниками Вороного. Частицы же, принадлежащие внутренним слоям обоих полупространств модельного образца, разделим на две группы по признаку попадания их многогранника Вороного в плоскость среза: 1) имеющие на ней соответствующий многоугольник сечения; 2) не имеющие такового многоугольника. Очевидно, каждая частица 2-й группы локализуется (строго или нестрого) за одной либо несколькими ближе к поверхности расположенными частицами, и потому «экранируется» («затеняется») ими. Назовем частицы этой группы «затененными», а частицы 1-й группы, соответственно, «незатененными». С увеличением расстояния  $|z|$  возрастает число частиц, находящихся ближе к плоскости среза, поэтому область «тени» будет расширяться, а доля незатененных частиц – напротив, уменьшаться (вплоть до нуля).

В таблице приведены значения относительной частоты (вероятности) попадания незатененной частицы в каждый из слоев в модели с различной плотностью упаковки. Как и предполагалось, в глубинной области, а в более плотных упаковках – уже в третьем (или даже втором) скрытом слое, все частицы (или абсолютное их большинство) оказываются затененными. Иными словами, изображение на плоскости среза содержит информацию, главным образом, о местоположении незатененных частиц, поэтому объемная реконструкция глубоких скрытых слоев практически невозможна.

Более точно обсуждаемая статистическая зависимость описывается эмпирическими функциями плотности вероятности, представленными на рисунке 2. В диапазоне  $0 \leq z < R$  (поверхностном слое) все частицы структуры являются незатененными и почти равномерно распределены по глубине. Точное равномерное распределение частиц, как показано нами ранее, соответствует абсолютной однородности неупорядоченной дисперсной структуры, которая трудно достижима в моделях ограниченного размера [3].



**Рис. 2.** Функции плотности вероятности нахождения незатененной частицы (размер  $R = 7.5$ ) на глубине  $z$  от поверхности образца с коэффициентом упаковки: 1 –  $\eta = 0.15$ , 2 –  $\eta = 0.20$ , 3 –  $\eta = 0.30$

Местоположение незатененных частиц некоторым образом взаимосвязано с характеристиками многоугольников – сечениями соответствующих им многогранников Вороного. Рассмотрим сначала частицы, принадлежащие поверхностным слоям. Координаты  $Z_i$  центров таких частиц однозначно определяются с точностью до знака, исходя из радиуса  $r_i$  их круглых сечений. Визуально обнаруживается, что меньшим сечениям частиц соответствуют меньшие же многоугольники – таким образом, между модулем величины  $Z_i$  и площадью многоугольника  $S_i$  существует некоторая отрицательная корреляция. Как сечения частиц, так и координаты  $(x_i, y_i)$  их центров строго принадлежат соответствующему многоугольнику сечения. Для частиц скрытых слоев такая принадлежность уже неочевидна, т.к. проекция центра каждой такой частицы на плоскость среза может лежать и в близкой окрестности соответствующего многоугольника сечения. Отрицательная же корреляция удаления  $|z|$  от поверхности и площади  $S$  многоугольника, вероятно, сохранится (для глубоких слоев  $S \rightarrow 0$ ). Площадь многоугольника  $S_i$ , по-видимому, можно связать с экранирующей способностью  $i$ -ой частицы в смысле затенения других, более удаленных частиц (с увеличением  $|z|$  мощность множества еще незатененных частиц уменьшается, поэтому логично снижение, вплоть до нуля, и экранирующей способности).

Статистические зависимости, полученные в результате обработки данных о площади всех многоугольников сечения на изображении среза, и приведенные на рисунке 3, подтверждают высказанные выше предположения.

Таким образом, для однородно неупорядоченной монодисперсной системы заданной плотности упаковки установлены следующие статистические зависимости:

число незатененных частиц в любом слое структуры уменьшается с удалением от плоскости ее среза, как показано на рисунке 2;

при удалении незатененной частицы от плоскости среза площадь многоугольника сечения соответствующего ей многогранника

Вороного, а, значит, и ее экранирующая способность уменьшаются, как показано на рис. 3.

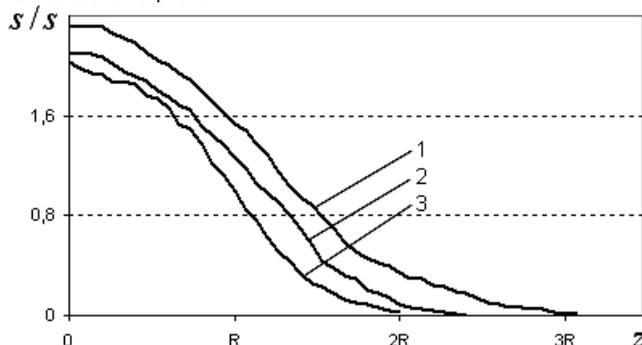


Рис. 3. Влияние расстояния частицы до поверхности на относительную площадь многоугольника сечения соответствующего ей многогранника Вороного, при коэффициенте упаковки: 1 –  $\eta = 0.15$ , 2 –  $\eta = 0.20$ , 3 –  $\eta = 0.30$

**Методика локализации монодисперсных частиц по изображению плоского среза.** Предлагаемая методика реконструкции монодисперсной структуры по изображению ее плоского среза базируется на установленных статистических закономерностях и заключается в определении правдоподобных положений (вероятностной локализации) незатененных частиц в поверхностных и скрытых слоях структуры. При этом реконструкции подлежат не только частицы, расположенные в оставшейся после среза части образца (нижнем полупространстве), но также и частицы в верхнем полупространстве (где  $z < 0$ ), поскольку они также влияют на вид объемного разбиения Вороного-Делоне всей структуры.

Первый этап реконструкции относится к частицам поверхностных слоев, локализация которых возможна непосредственно по изображению среза – так, координаты  $(x_i, y_i)$  центров таких частиц радиуса  $R$  в точности соответствуют координатам центров их сечений радиуса  $r_i$ , а координаты  $z$  вычисляются с точностью до знака:

$$z_i = \pm \sqrt{R^2 - r_i^2}. \quad (1)$$

Координате произвольно выбранной первой частицы знак присваивается случайным образом. Для последующих частиц знак  $z_i$  может быть однозначно предопределен, если добавление новой частицы в одно из полупространств невозможно из-за перекрытия с некоторыми из ранее размещенных частиц. В противном случае знак координаты выбирается случайно, с обязательным соблюдением условия постоянства коэффициента упаковки – т.е. равенства числа частиц в обоих поверхностных слоях.

Заметим, что общее количество  $2n_0$  частиц двух поверхностных слоев, толщиной  $R$  каждый, в точности равно числу сечений частиц на изображении среза, при этом коэффициент упаковки образца с площадью сечения  $A$  находится из соотношения:

$$\eta = \frac{4\pi R^2}{3A} n_0. \quad (2)$$

Используя зависимость вида  $p = p(z; \eta)$  (см. рис. 2) находим общее число незатененных частиц в каждом из полупространств:

$$N = \frac{n_0}{\int_0^R p(z; \eta) dz}, \quad (3)$$

среднюю площадь многоугольников сечений многогранников Вороного:  $\bar{s} = 0.5 A / N$ , (4)

а также предельно возможную для данного метода реконструкции глубину:

$$z_{\max}(\eta) = \arg\{p(z; \eta) \mid p(z; \eta) \rightarrow 0\}. \quad (5)$$

Ключевым элементом методики реконструкции является моделирование затенения более глубоких слоев структуры уже локализованными частицами. Поскольку в процессе реконструкции (впрочем, и по ее окончании) точная структура многочастичной системы неизвестна, корректное построение многогранников Вороного, равно как и многоугольников их сечений, невозможно. Поэтому предлагается замещать предполагаемые многоугольники эквивалентными затеняющими экранами стандартной формы. Эффективность затенения связана с площадью экрана, поэтому эквивалентный радиус экрана, имеющего форму диска, для каждой локализованной частицы может быть найден с использованием статистической зависимости относительной площади многоугольника от глубины размещения частицы (см. рис. 3):

$$\sigma_i = \sqrt{s_i} / \pi = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{s}{\bar{s}}(z_i; \eta) \cdot \bar{s}}. \quad (6)$$

При размещении на изображении среза системы, каждый такой экран центрируется с соответствующим сечением частицы, как показано на рис. 4.

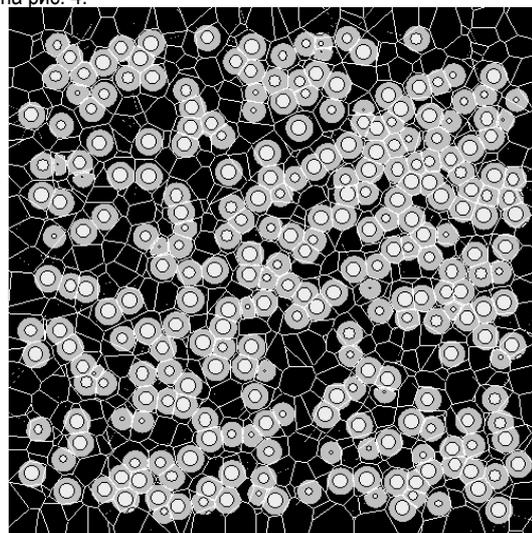


Рис. 4. Замещение сечений многогранников экранами в виде дисков эквивалентного радиуса

На втором этапе выполняется вероятностная локализация (поиск правдоподобного положения) для  $2n = 2(N - n_0)$  частиц скрытых слоев. Алгоритм состоит из  $n/m$  циклов, на каждом из которых локализуется  $2m$  частиц.

Для предельного случая  $m = 1$  в цикле выполняются следующие действия:

1. Определяется приращение  $\Delta_k$  координаты  $z$  такое, чтобы в двух тонких плоскопараллельных слоях  $(z[k]; z[k+1])$  и  $(-z[k]; -z[k+1])$  находилось ровно две незатененные частицы (по одной в слое). При этом  $z[1] = R$ ,  $z[k+1] = z[k] + \Delta_k$ , а искомое приращение определяется по зависимостям рис. 2 из неявного соотношения:

$$N \cdot \int_{z[k]}^{z[k] + \Delta_k} p(z; \eta) dz = 1.$$

2. На изображении среза генерируется случайное размещение двух экранов, размер которых определяется по зависимостям рис. 3 (площадь  $s[k] = \frac{s}{\bar{s}}(z[k]; \eta) \cdot \bar{s}$  и радиус  $\sigma[i] = \sqrt{s[i]} / \pi$ ) – так, чтобы они не перекрывались с эквивалентными экранами ранее локализованных частиц. Найденным положениям экранов

будут соответствовать две пары координат их центров  $(x[k], y[k])$  и  $(\bar{x}[k], \bar{y}[k])$ .

3. К найденным парам координат на плоскости добавляются значения  $z[k]$  и  $-z[k]$  третьей координаты, после чего проверяется условие физической реализуемости: возможность размещения частиц с координатами центров  $(x[k], y[k], \pm z[k])$  и  $(\bar{x}[k], \bar{y}[k], \mp z[k])$  в обоих полупространствах системы без перекрывания.

Небольшое перекрывание частиц устраняется корректировкой положения размещаемой частицы: в пределах величины  $\Delta_k$  в сторону увеличения удаления  $|z|$ , в диапазоне  $\pm 0.5\Delta_k$  – по координатам  $x$  и  $y$ . При большом перекрывании одной или обеих частиц с частицами, размещенными ранее, необходимо вернуться к генерации нового размещения одного либо обоих экранов согласно п. 3.

**Анализ эффективности методики вероятностной локализации частиц.** Предложенная методика тестировалась в ходе серии вычислительных экспериментов с моделями неплотных монодисперсных систем с коэффициентом упаковки  $\eta = 0.15 \dots 0.30$ .

Каждый модельный образец представлялся для реконструкции в виде плоского среза с сечениями частиц (без многоугольников сечения многогранников Вороного). После выполнения локализации всех возможных, в зависимости от коэффициента упаковки, частиц производилось сравнение полученных координат частиц скрытых слоев с фактическими координатами частиц, которые имеют на плоском срезе сечение многогранника Вороного (их реальное положение в данном модельном образце точно известно). Факт успешной локализации частицы фиксировался, если ее центр отклонялся от центра реальной частицы на величину, не превышающую  $\pm R$ , а обе частицы принадлежали одному и тому же полупространству модельного образца. Достоверность методики при этом определялась как отношение числа успешно локализованных частиц к числу всех частиц, потенциально возможных для локализации (частицы внешних поверхностных слоев не учитывались).

В результате тестирования установлено, что достоверность предложенной методики существенно зависит от коэффициента упаковки монодисперсной системы. Так, для разреженных структур ( $\eta = 0.15$ ) она составляет  $0.16 \dots 0.19$ , а для более плотных ( $\eta = 0.30$ ) –  $0.40 \dots 0.43$ .

Ошибка вероятностной локализации в наибольшей степени обусловлена неоднозначностью размещения локализуемых частиц в одном из полупространств образца. Эта неоднозначность существует даже в процессе реконструкции внешних поверхностных слоев. Таким образом, достоверность локализации выше 0.5 вряд ли достижима. В некоторых случаях, однако, возможна однозначная реконструкция всех частиц внешнего слоя. Так, например, если в качестве частиц выступают поры, то, анализируя поверхность физического образца, пример которого приведен на рисунке 5, легко установить, глубокая ли пора попала в сечение, т.е. принадлежит ли она нижнему полупространству.

На ошибочную локализацию влияет также то обстоятельство, что проекции центров скрытых частиц на плоскость среза в ряде случаев лежат вне соответствующих им многоугольников сечения. Данная проблема может быть связана с практической невозможностью достижения идеального (однородного) беспорядка в модели многочастичной системы ограниченного размера.

Увеличение ошибки реконструкции частиц в разреженной системе обусловлено возрастанием неопределенности положения локализуемых частиц в большем пространстве системы, свободном от частиц.

Оценивалась также эффективность предлагаемой методики в сравнении с простейшим способом «сплошного поиска» частиц. Такой метод можно представить как «сверление» образца в различных

точках поверхности с целью «наткнуться» на частицу, расположенную в скрытом слое образца. Чтобы гарантированно найти все скрытые монодисперсные частицы радиуса  $R$ , точки сверления должны располагаться в узлах регулярной треугольной сетки, период которой не превышает  $\sqrt{3}R$ . Сетка при этом должна покрывать область, незатененную частицами поверхностных слоев, т.е. часть поверхности образца, не занятую сечениями этих частиц (область темного цвета на рис. 4).

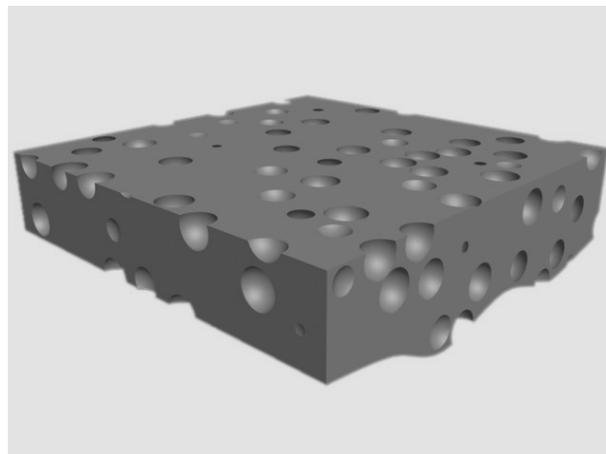


Рис. 5. Фрагмент образца с пористой монодисперсной структурой

Рассчитано, что в модельном образце монодисперсного материала размером  $460 \times 240$  с коэффициентом упаковки  $\eta = 0.30$  и радиусом частиц 7.5 для нахождения всех 180 незатененных частиц (находящихся в скрытом слое на глубине до 15), необходимо выполнить 1040 попыток «сверления», а для достоверного определения не менее 40% частиц – 415 попыток. Использование же предложенной методики позволяет достичь достоверности локализации частиц 0.40, т.е. надежно обнаружить 72 частицы всего при 180 попытках. Таким образом, новая методика оказывается примерно в 2,3 раза эффективнее. С уменьшением плотности упаковки эффективность методики несколько снижается. Так, модельный образец аналогичного размера с коэффициентом упаковки  $\eta = 0.18$  содержит 157 незатененных частиц скрытого слоя (на глубине до 22.5), которые полностью обнаруживаются примерно 1160 попытками «сплошного поиска», а достоверность обнаружения 0.17 обеспечивается почти 200 попытками. Предложенная методика обеспечивает надежное обнаружение 27 частиц из общего числа локализованных 157 (эффективность 1,27).

**Выводы.** В результате исследования моделей неплотных монодисперсных систем с использованием пространственного разбиения Вороного-Делоне показано, что объемная структура системы частично реконструируется по изображению ее плоского среза. Потенциально возможна локализация частиц во внутренних (скрытых) слоях, если они не затенены (не экранируются) другими, ближе к поверхности расположенными частицами.

Вычислительными экспериментами и статистической обработкой их результатов выявлено, что вероятность наличия незатененной частицы, а также ее экранирующая способность уменьшаются с увеличением глубины размещения в модельном образце. На основе этих статистических зависимостей разработана новая методика объемной реконструкции структуры монодисперсной системы, включающая вероятностную локализацию частиц в скрытых слоях.

В ходе тестирования показано, что достигаемая достоверность локализации незатененных частиц в скрытых слоях возрастает с 16 до 43% с увеличением коэффициента упаковки частиц с 0.15 до 0.30. Эффективность новой методики, оцениваемая как относительная, в сравнении со способом сплошного поиска частиц, число попы-

ток локализации, увеличивается с 1,2 до 2,3 раз с ростом плотности упаковки в том же диапазоне.

Предложенная методика может применяться в решении задач вычислительного материаловедения, а именно – в исследованиях внутренней (объемной) структуры композиционных, в частности пористых, материалов по их изображениям в плоском срезе (шлифе).

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bentz, D.P. Three-dimension computer-simulation of Portland-cement hydration and microstructure development / D.P. Bentz // J. of the American Ceramic Society. – 1997. – Vol. 80, No 1. – P. 5–21.

2. Дереченик, С.С. Закономерности топологической неупорядоченности в плоских сечениях и объемах дисперсных систем / С.С. Дереченик, В.С. Разумейчик, В.В. Тур // Вестник Брестского государственного технического университета. Сер. Строительство и архитектура. – 2005. – № 2 (32). – С. 18–25.
3. Разумейчик, В.С. Структурно-химическое моделирование гидратации цементного композита / В.С. Разумейчик // Вестник Брестского государственного технического университета. Сер. Строительство и архитектура. – 2006. – № 1(38). – С. 91–96.
4. Медведев, Н.Н. Метод Вороного-Делоне в исследовании структуры некристаллических систем / Н.Н. Медведев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 213 с.

Материал поступил в редакцию 12.11.08

#### NIKOLAYUK-RTSISHCHAVA M.U., DERECHENNIK S.S. The technique for volume reconstruction of monodisperse structure: the localization of invisible subsurface layer particles

Topological features of Voronoi-Delaunay polyhedron and its plane cross-section in statistic correlation with the arrangement of particles were investigated relating to models of disordered systems of mono-sized particles with 0.15...0.30 packing density. New reconstruction technique for volume structure based on its plane section image is proposed – in the case of accommodation of surface layer dispersive particles and probabilistic localization of inner layer particles, which are not shadowed with near-surface particles. Analysis of reliability of the new technique is presented as far as its advantages in comparison with the way of continuous search.

УДК 656.13.08

Шендер А.В., Пустовойт Е.Н., Карпилович В.Ю.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

**Введение.** Увеличение эффективности использования существующих транспортных сетей очень важно, поскольку интенсивность транспортных потоков постоянно растет, в то время как возможности создания новых дорог весьма ограничены. Например, в США с 1987г. по 1997г. суммарный пробег транспортных средств увеличился на 33 процента, в то время как суммарная длина дорог выросла всего на 2 процента.

В качестве альтернативы строительству новых дорог существует возможность более эффективного использования существующих. Это стало возможным благодаря применению Интеллектуальных Транспортных Систем (ИТС), которые позволяют снизить время поездки, время простоя в пробках и на перекрестках, снижая, тем самым, вредные выбросы автомобилей.

Неотъемлемой компонентой ИТС являются детекторы транспорта. Они, в некотором смысле, являются «глазами» ИТС, которые сообщают основные параметры транспортных потоков системе управления дорожным движением [1-3].

Для человеческих глаз несложно выявить присутствие автомобиля на определенном участке дороги: достаточно посмотреть и обнаружить. В заданный конкретный промежуток времени, человек способен с точностью подсчитать, сколько автомобилей проходит через определенную точку. Однако, с увеличением потока автомобилей эта задача становится более трудной. А если еще потребуется определить и вес автомобиля, то и вовсе нереальной.

За последнее время в этом направлении проведены многочисленные исследования, благодаря которым стало возможно с точностью определить не только количество автомобилей, проходящих через заданную точку, но также и их тип (легковые, грузовые и т.д.), вес, и идентифицировать (по регистрационному номеру, транспондеру и т.д.).

Детекция - обнаружение, выявление присутствия транспортного средства на автомагистрали и определение необходимых его характеристик (габариты, вес и т.д.). Детекция применяется в основном для слежения за плотностью транспортного потока на магистрали. Это необходимо, например, дорожным службам, для того чтобы

следить за разрушением дорожного полотна [4].

Теперь уже с точностью можно утверждать, что конкретный автомобиль находился на определенном участке дороги в определенное время. Можно зафиксировать и такие данные: сколько человек находилось в автомобиле при поездке в заданном направлении, и сколько находилось в этом же автомобиле при возвращении обратно.

В Японии в законодательном порядке предписывается собирать подобную информацию и сохранять ее по всем видам транспортных средств. В разных странах для организаций, занимающихся эксплуатацией дорог, существуют законодательства по сбору и хранению информации, которая используется в различных целях.

Во Франции ведется непрерывный контроль за уровнем движения, и когда на какой-либо дороге отмечают, что интенсивность движения превысила пропускную способность, эта дорога ставится в план на расширение.

**1. Классификация детекторов транспорта.** Детектор транспорта является источником информации о параметрах транспортных потоков в контролируемой зоне АСУ ДД.

Известно много различных принципов (чувствительных элементов), на основе которых создавались детекторы транспорта. В их числе детекторы:

#### 1) КОНТАКТНЫЕ:

- контактно-механические, пневматические;
- электромеханические (состоит из двух стальных полос герметически завулканизированных резиной. При наезде колес автомобиля контакты на чувствительном элементе замыкаются и формируется электрический импульс);
- пневмоэлектрические (резиновая трубка, заключенная в стальной лоток. При наезде на трубку давление воздуха в ней повышается, действуя на мембрану пневмореле и замыкая его электрические контакты);
- пьезоэлектрические (полимерная пленка, обладающая способностью поляризоваться на поверхности электрический заряд при механической деформации); (из-за пониженной износостойкости

Шендер Андрей Витальевич, инженер программист УП «КБСТ» Белорусский государственный университет.

Пустовойт Евгений Николаевич, начальник конструкторского бюро УП «КБСТ» Белорусский государственный университет.

Карпилович Владимир Юрьевич, к.т.н., УП «КБСТ» Белорусский государственный университет.

Беларусь, БГУ, 220050, г. Минск, пр. Независимости, 4.

Физика, математика, информатика