

*Л.З.БОГУСЛАВСКИЙ*, канд. техн. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

*Н.С.НАЗАРОВА*, канд. техн. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

*Л.Е.ОВЧИННИКОВА*, канд. техн. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

*С.С.КОЗЫРЕВ*, канд. техн. наук, Национальный университет кораблестроения, Николаев;

*С.Б.ПРИХОДЬКО*, канд. техн. наук, Национальный университет кораблестроения, Николаев

## **МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА НАНОЧАСТИЦ УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМ СПОСОБОМ**

Розроблено методику побудови аналітичної моделі закону розподілу розмірів синтезованих наночастинок вуглецю та оцінки довірчих інтервалів статистичних моментів негаусовських випадкових величин за експериментальними даними.

An analytical model of the distribution law of size synthesis carbon nanoparticles from the experimental data and an estimate of the confidence intervals of the statistical moments negausovskih random variables based on transformations normalize.

Разработана методика построения аналитической модели закона распределения размеров синтезированных наночастиц углерода и оценки доверительных интервалов статистических моментов негаусовских случайных величин по экспериментальным данным.

**Введение.** Массовое производство углеродсодержащих наноматериалов, которые находят широкое применение в различных областях науки и техники благодаря сочетанию свойств и параметров, недостижимых для традиционных моно- и поли- кристаллических структур, сдерживается несовершенством методов их синтеза [1]. Результаты исследований по применению высокочастотной дуги для синтеза наноуглерода из газообразных сред подтверждают возможность получения твердой углеродной сажи при электро-разрядном воздействии на газообразные углеводороды, при этом устраняются трудоемкие операции сушки, очистки и разделения по качественному и фракционному составу полученного наноуглерода. Установлено, что для синтеза наноуглерода из газообразных углеродсодержащих сред необходимо использовать неравновесную плазму, то есть создавать специальные условия синтеза.

Основным препятствием на пути совершенствования способов синтеза наноуглерода в промышленных объемах было отсутствие оборудования, по-

звляющего гибко менять режимы обработки и условия проведения экспериментальных исследований для отработки оптимальной технологии синтеза, а также отсутствие средств текущего контроля реакционных параметров и создания базы данных для дальнейшего анализа результатов.

В Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины создана экспериментальная установка для плазмохимического синтеза наноглерода из газообразного углеродсодержащего сырья посредством его высокочастотной разрядноимпульсной обработки, которая позволяет создавать условия для синтеза материала с заданными свойствами [2]. Разработана система мониторинга процесса синтеза наноглерода, позволяющая контролировать параметры плазмохимической реакции в реальном времени, создавать базы данных для последующей обработки и анализа с целью синтеза наноматериалов с заданными свойствами [3].

Для построения по результатам экспериментальных данных адекватных зависимостей количественных характеристик углеродных наноматериалов, синтезируемых путем объемной электроразрядной обработки углеродных сред, от входных параметров плазмохимического синтеза необходимо определить закон распределения размеров полученных наночастиц.

**Целью работы** является разработка методики построения аналитической модели закона распределения размера наночастиц, полученных в результате электроразрядной обработки углеродных сред, для дальнейшего использования его при определении условий синтеза наноматериалов с заданными свойствами.

**Построение аналитической модели закона распределения** является способом обобщенного представления экспериментальных данных в тех случаях, когда отсутствует теоретическое обоснование закона распределения случайной величины или функции.

Для описания экспериментальных данных аналитическую модель закона распределения строим, используя распределение Джонсона. Его преимущество по сравнению с распределением Пирсона состоит в том, что после определенных преобразований оно приводит к нормально распределенной случайной величине. Большое количество статистических критериев, методов и оценок разработаны в основном только для случая нормального начального распределения. Это касается и нахождения интервальных оценок характеристик случайной величины, в том числе и статистических моментов, что является наиболее полным и надежным методом оценки.

Для построения аналитической модели закона распределения размера наночастиц углерода по экспериментальным данным и оценки доверительных интервалов статистических моментов разработана программа, позволяющая в полуавтоматическом режиме определить по микрофотографии образца продукта синтеза минимальный и максимальный Feret-диаметры частиц и их площадь (рис.1).

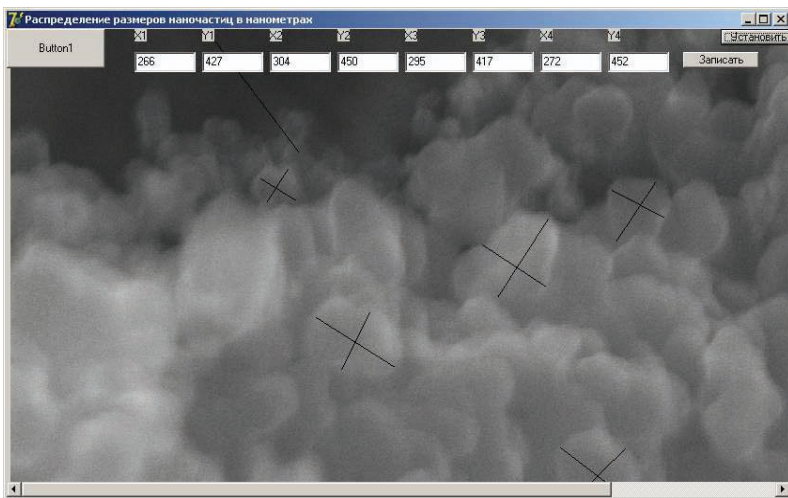


Рисунок 1 – Интерфейс программы для определения размеров наночастиц

Полученное в результате обработки экспериментальных данных распределение значений размеров наночастиц отличается от нормального. Для определения доверительных интервалов точечных оценок статистических моментов может быть применен специально разработанный подход [4]. Сначала с помощью нормализующего преобразования начальные данные преобразуются таким образом, чтобы иметь распределение Гаусса (или приближенное к нему). Далее для преобразованных (нормализованных) данных находят оценки доверительных интервалов статистических моментов нормализованной случайной величины. На основе обратного преобразования и найденных оценок вычисляют оценки доверительных интервалов статистических моментов начальной негауссовской случайной величины.

Семейства распределений Джонсона отличаются разнообразием форм и в плоскости асимметрии в квадрате  $A^2$  и эксцессе  $\epsilon$  занимают значительные области. На рис. 2 представлена диаграмма Джонсона (области комбинаций  $A^2$  и  $\epsilon$  для разных распределений Джонсона). Эта диаграмма позволяет подобрать семейство распределений Джонсона по значениям оценок  $A^2$  и  $\epsilon$  выборочного распределения [5].

Практически всегда при подборе аналитической модели закона распределения экспериментальных данных асимметрия  $A$  и эксцесс  $\epsilon$  не известны. В этом случае выбор семейства распределений Джонсона осуществляется по оценкам асимметрии  $A$  и эксцесса  $\epsilon$ , которые находятся по гистограмме. После выбора необходимого семейства распределений Джонсона вычисляют его параметры, и выполняют проверку адекватности избранной модели экспериментальным данным по критерию согласия, например, критерию Пирсона ( $\chi^2$ ). В случае, когда эксцесс случайной величины больше трех, то непара-

метрическая оцeнка, котopая базиpуетcя на pаспpеделении Гаусса, пpиводит к увеличению длины доверительных интервалов точечных оценок ее статистических моментов по сравнению с приведенным подходом на основе применения нормализующего преобразования Джонсона.

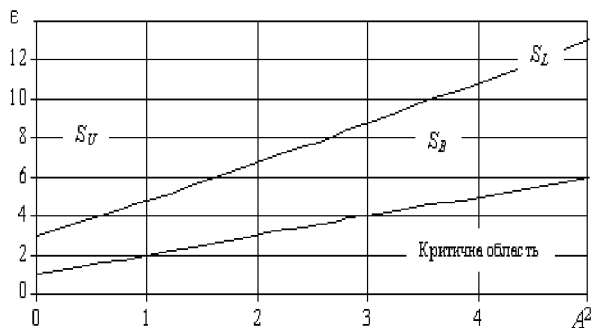


Рисунок 2 – Комбинации  $A^2$  и  $\epsilon$  для разных распределений Джонсона

**Выводы.** Для получения достоверных несмещенных оценок количественных характеристик размеров синтезированных наночастиц предложенным методом достаточно обрабатывать случайную выборку, в три раза меньшую, чем при предположении о нормальности закона распределения, так как закон распределения размеров наночастиц углерода характеризуется большим эксцессом (больше трех).

С применением описанного метода построена аналитическая модель закона распределения размера наночастиц углерода по экспериментальным данным и получена оценка доверительных интервалов статистических моментов негауссовских случайных величин на основе нормализующих преобразований, что является теоретической основой для построения адекватных зависимостей количественных характеристик полученных наночастиц от входных параметров плазмохимического синтеза.

**Список литературы.** 1. Кускова, Н. И. Электровзрывные методы синтеза углеродных наноматериалов / Н. И. Кускова, Л. З. Богуславский, А. Д. Рудь, В. Н. Уваров, Л. И. Ивацук, А. Е. Перекоп, В. И. Орешкин // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2008. – Т. 30, № 6. – С. 833-847. 2. Богуславский, Л. З. Экспериментальная установка для управляемого плазмохимического синтеза наноуглерода из газообразного сырья с системой контроля параметров / Л. З. Богуславский, Н. С. Назарова, Л. Е. Овчинникова, Д. В. Винниченко; В. В. Диордийчук // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*. – 2011. – Ч. 1. – С. 326-331. 3. Богуславский, Л. З. Система мониторинга плазмохимического синтеза наноуглерода при высокочастотной разрядноимпульсной обработке газообразного углеродсодержащего сырья / Л. З. Богуславский, Н. С. Назарова, Л. Е. Овчинникова, Д. В. Винниченко; В. В. Диордийчук // *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Тематический выпуск. «Техника и электрофизика высоких напряжений»*. – № 49. – 2011. – X.: НТУ «ХПИ». – С. 27-35. 4. Приходько, С. Б. Інтервальне оцінювання параметрів стохастичних диференціальних систем на основі модифікації узагальненого методу моментів / С. Б. Приходько // *Матеріали XIII Міжнародного конгресу «Техніка та інженерія»*. – 2011. – Т. 1. – С. 10-13.

дної конференції з автоматичного управління, Вінниця, 2007 р. – С. 69-75. **5. Приходько, С.Б.** Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Обробка експериментальних даних на ЕОМ» / *С.Б. Приходько*. – Миколаїв: НУК, 2005. – 52 с.

*Поступила в редакцію 12.04.2012.*