

*Шаптала В. В., канд. техн. наук, доц.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ЦЕМЕНТА

ShaptalaVadim@yandex.ru

*Разработана нейросетевая модель взаимного отображения параметров логарифмически-нормального и Розина-Раммлера распределений, которые применяются для описания зернового состава цемента на различных стадиях его производства.*

**Ключевые слова:** распределение частиц по размерам, нейронные сети, взаимное отображение параметров законов распределений.

Большинство технологических процессов производства цемента протекают в газодисперсных средах, сопровождаются значительными выделениями пыли, поэтому обязательно включают в себя операции пылеосаждения и газоочистки. Важнейшей характеристикой цемента и цементных аэрозолей является распределение частиц по размерам, которое по сложившейся традиции в различных технологических процессах описывается с помощью различных соотношений [1, 2]. В процессах измельчения, сепарации и в качестве готового продукта зерновой состав частиц цемента описывается с помощью закона Розина-Раммлера-Беннета (RRB) [3...5]:

$$R(d) = \exp\left(-\left(\frac{d}{d'}\right)^n\right), \quad (1)$$

где  $d$  – размер частиц, мкм;  $R(d)$  – интегральная функция распределения по остатку или остаток на сите с размером ячеек  $d$ ;  $n$  – коэффициент равномерности;  $d'$  – характерный размер частиц, равный размеру ячеек сита, допускающего проход 63,2% массы просеиваемого цемента.

Параметры распределения  $n$  и  $d'$  идентифицируются по опытным данным. С помощью распределения RRB определяется соотношение средней (+5-30 мкм) и тонкой (-5 мкм) фракций цемента:

$$\frac{\Delta D(+5-30)}{D(5)} = \frac{\exp\left(-\left(5/d'\right)^n\right) - \exp\left(-\left(30/d'\right)^n\right)}{1 - \exp\left(-\left(5/d'\right)^n\right)} \quad (2)$$

и его удельная поверхность [6]:

$$S = \frac{6n}{\rho d'} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \left(\frac{d}{d'}\right)^{n-2} \exp\left(-\left(\frac{d}{d'}\right)^n\right) d\left(\frac{d}{d'}\right) \quad (3)$$

Здесь  $D(d) = 1 - R(d)$  – интегральная функция распределения по проходу или проход через сито с размером ячеек  $d$ . Точность распределения RRB в области мелких ( $d < 5$  мкм) частиц может быть повышена путем введения переменного, т.е. зависящего от  $d$ , показателя равномерности распределения  $n(d)$  [7].

В процессах пылеосаждения, газоочистки и пневмотранспорта распределение частиц цемента по размерам принято описывать с помощью логарифмически нормального закона Колмогорова-Хэча-Чета (LND) [8]:

$$R(d) = 1 - \Phi(t), \quad (4)$$

где  $\Phi(t)$  – интеграл вероятностей, значения которого приводятся в таблицах [9]:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz, \quad (5)$$

$$t = \frac{\lg d - \lg d_{0,5}}{\lg \sigma}, \quad (6)$$

где  $d_{0,5}$  – медианный размер частиц цемента;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение размера частиц,  $\sigma = d_{0,84}/d_{0,5} = d_{0,5}/d_{0,16}$ . Здесь  $d_{0,16}$  и  $d_{0,84}$  – размеры частиц, для которых значения интегральной функции по проходу соответственно равны 0,16 и 0,84.

Для прогнозирования полной степени сухого инерционного улавливания частиц цемента в циклонах-осадителях или в циклонах систем газоочистки применяются соотношения [9]:

$$\eta = \Phi(x) \quad (7)$$

$$x = \frac{\lg d_{0,5} - \lg d_{50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma + \lg^2 \sigma_\eta}} \quad (8)$$

где  $d_{50}$  – размер частиц, улавливаемых на 50%,  $\lg \sigma_\eta$  – параметр, характеризующий дисперсию фракционных коэффициентов осаждения.

Параметр  $\lg \sigma_\eta$  определяется опытным путем ( $0,3 \leq \lg \sigma_\eta \leq 0,4$ ), а  $d_{50}$  выражается через конструктивно-технологические параметры пылеулавливателей с помощью эмпирических соотношений [7].

В связи со сложившейся двойственностью подхода к описанию дисперсного состава цемента возникает необходимость перехода от одного закона распределения к другому минуя стадию инструментального анализа зернового состава и последующей математической обработки его результатов. В настоящее время ана-

литического метода пересчета параметров распределения Розина-Рамллера ( $d', n$ ) в параметры логарифмически нормального распределения ( $d_{50}, \sigma$ ) и наоборот не существует.

Эта задача может быть решена с использованием нейронных сетей, которые являются эффективным средством построения взаимных отображений множеств объектов различной природы [10].

Для решения поставленной задачи была выбрана радиально-базисная нейронная сеть, так как она обладает по сравнению с многослойной сетью более простой архитектурой и высокой скоростью обучения. Сеть имеет два входа, на которые подаются параметры распределения Розина-Рамллера:  $d', n$  и два выхода, возвращающие параметры логарифмически-нормального распределения:  $d_{50}, \sigma$ , а также скрытый слой радиально-базисных нейронов.

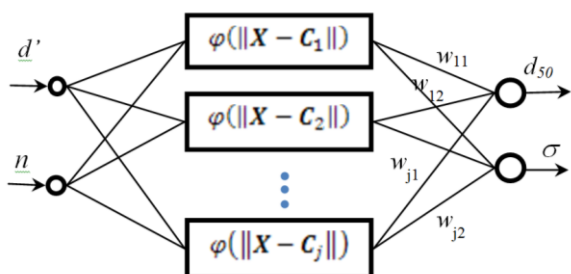


Рис. 1. Структура RBF-сети взаимного преобразования параметров законов распределения частиц цемента по размерам

Обучающая выборка была получена путем восстановления таблиц зернового состава с заданными параметрами распределения Розина-Рамллера с последующим определением параметров логарифмически нормального распределения по методу наименьших квадратов. Параметры распределения Розина-Рамллера в свою очередь формировались случайным образом: для  $d'$  из диапазона 8...32 мкм, а для  $n$  из диапазона 0.8...1.02. Всего было сгенерировано  $Q = 60$  обучающих примеров. В качестве активационных функций нейронов использовалась функция Гаусса:

$$\varphi(\|X - C_j\|) = \exp\left(-\frac{\|X - C_j\|^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (9)$$

где  $C_j$  - центр активационной функции  $j$ -го нейрона;  $\sigma$  - среднеквадратическое расстояние от центра до ближайших соседей;  $X$  - параметры текущего распределения, подаваемые на вход.

В практически используемых RBF-сетях число нейронов скрытого слоя выбирают значительно меньше числа обучающих примеров с целью предотвращения переобучения сети,

ослабляющего ее обобщающие свойства. Поэтому целесообразно предварительно выполнить кластеризацию распределений, т.е. объединить близкие между собой распределения в группы. К примеру, можно выделить три группы распределений для частиц цемента различной марочности. Кластеризация в данном случае проводилась с помощью слоя Кохонена. Результаты кластеризации приведены на рисунке 2.

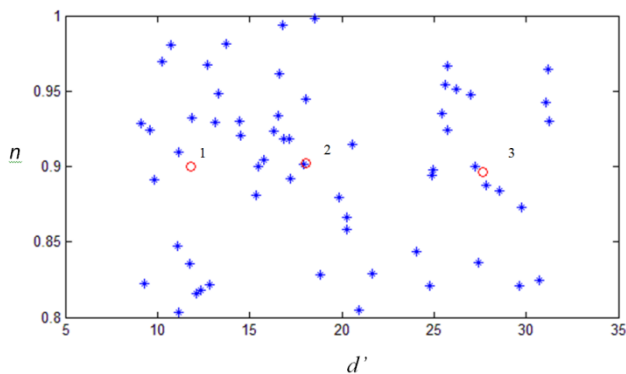


Рис. 2. Кластеризация множества распределений Розина-Рамллера (1, 2, 3 - центры кластеров распределений по степени дисперсности цемента)

Обучение радиально-базисной нейронной сети сводится к минимизации ее квадратичной ошибки

$$\varepsilon = \sum_{q=1}^Q \left[ \sum_{j=1}^J w_j \varphi(\|X_q - C_j\| - d_q) \right]^2 \quad (10)$$

За 50 итераций обучения было достигнуто выполнение условия  $\varepsilon \leq 10^{-5}$ . Таким образом была спроектирована и обучена нейронная сеть, способная получать параметры логарифмически-нормального закона по параметрам того же зернового состава, заданного законом Розина-Рамллера. Результаты тестирования спроектированной нейронной сети показаны на рис. 3.

Тестирование нейронной сети показало, что максимальное расхождение между параметрами логарифмически нормального распределения, полученными по восстановленной таблице, и с использованием нейронной сети не превышает допустимых в инженерных расчетах погрешностей.

Аналогично создается нейронная сеть для преобразования параметров логнормального распределения в параметры распределения Розина-Рамллера.

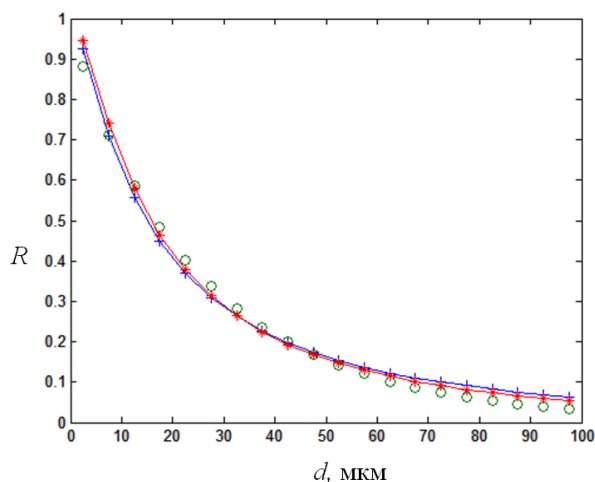


Рис. 3. Результат тестирования нейронной сети:

- ° - значения интегральной функции распределения частиц цемента по остатку  $R$ , восстановленные по распределению Розина-Рамлера  $d' = 25$  мкм,  $n = 0.9$ ;
- + - аппроксимация функции  $R$  логарифмически-нормальным законом с параметрами, полученными с использованием метода наименьших квадратов,  $d_{0.5} = 15.74$ ,  $\sigma = 3.14$ ;
- \* - аппроксимация функции  $R$  логарифмически-нормальным законом с параметрами, полученными с использованием нейронной сети,  $d_{0.5} = 15.51$ ,  $\sigma = 3.24$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев С.Е., Товаров В.В., Перов В.В. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. М.: Металургиздат, 1959. 437с.
2. Козов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1987. 312 с.
3. Rosin, P and Rammler, E. 1933. Regularities in the distribution of cement particles. J. Inst. Fuel, C. 29-33.
4. Богданов В.С., Несмеянов Н.П., Пироцкий В.З., Морозов А.И. Механическое оборудование предприятий промышленности строительных материалов. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1998. 180 с.
5. Шарапов Р.Р. Шаровые мельницы замкнутого цикла. Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. 270 с.
6. Шаптала В.В. Информационная система исследования свойств порошкообразных материалов. Проблемы и достижения строительного материаловедения: сб. докл. Международной научно-практической интернет-конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2005. С. 249-251.
7. Чалов В.А., Шаптала В.Г., Кушев Л.А. Моделирование процесса центробежного осаждения частиц и прогнозирование эффективности пылеуловителя // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2011. №2. С. 152-154.
8. Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении. Докл. АН СССР, 1941. Т. 31. №2. С. 132-137.
9. Справочник по пыле- и золоулавливанию. Под общ. ред. А.А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1963. 312 с.
10. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Н. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 452 с.