

## ФРАКТАЛЬНЫЙ ФОРМАЛИЗМ В ПРИМЕНЕНИИ К АНАЛИЗУ СВЧ-МОДИФИКАЦИИ НАТИВНОЙ ГЛИНЫ

©2016 М. М. Филяк, А. Г. Четверикова, О. Н. Каныгина, Л. С. Багдасарян

*Оренбургский государственный университет, пр. Победы, 13; 460018 Оренбург, Россия  
e-mail: KR-727@mail.ru*

Поступила в редакцию 05.07.2016 г.

**Аннотация.** Результат воздействия СВЧ-излучения на дисперсную систему, состоящую из частиц природной глины, оценен методами гранулометрии и фрактальной параметризации. Фрактальный анализ морфологии частиц проводили по цифровым изображениям образцов с использованием программного модуля FracLac 2.5. По изменению величин фрактальной размерности и лакуарности установлен двухэтапный характер агломерации частиц. Показано, что степень морфологической эволюции частиц пропорциональна времени воздействия СВЧ-излучения.

**Ключевые слова:** фрактальная размерность, лакуарность, дисперсная система, СВЧ-излучение, морфология частиц, алюмосиликаты.

### ВВЕДЕНИЕ

Спекание керамики является сложным и энергоемким процессом, поэтому непрерывно идет поиск новых более совершенных и энергоэффективных технологий получения функциональных материалов. Например, нагрев, сушка и обжиг керамических материалов в СВЧ-поле используются в технологии получения диэлектрических и полупроводниковых материалов [1]. С помощью СВЧ-волн можно создавать более однородные тепловые поля в диэлектриках и интенсифицировать процессы твердофазных реакций.

Основные свойства керамических материалов закладываются уже на стадии формирования структуры керамической массы: минералогического, химического и гранулометрического состава частиц, их удельной поверхности и качества самой поверхности. Однако исследований, связанных с изучением возможностей модифицирования частиц глинистых порошков, составляющих керамическую массу, с помощью СВЧ-излучения и влияния результатов этой модификации на свойства керамики, еще явно недостаточно.

Целью данной работы является изучение воздействия СВЧ-излучения на дисперсные системы, состоящие из частиц природной монтмориллонит содержащей глины и адсорбированной ими воды.

Существуют мнения [2, 3], что заметных изменений в фазовых составах при таких воздействиях не наблюдается, поэтому для анализа результатов модификации вместо классических рентгеноструктурных методов есть смысл выбрать другие. СВЧ-воздействие на дисперсную систему представляет собой множество локальных взаимодействий внутри нее, которые в совокупности приводят к макроскопическому эффекту. Такие изменения в силу сложности поведения статистического ансамбля трудно предсказать. В результате проявляется непредсказуемость в поведении всей системы, а, следовательно, неизбежность статистического подхода.

Адекватно оценить реальные процессы, происходящие в системе, и объективно отразить влияние внешних воздействий, возможно, если выбрать такие методы оценки геометрии поверхности, которые способны не только охарактеризовать отдельные элементы, но и учесть свойства системы в целом. Очевидно, что традиционные методы количественной оптической и электронной микроскопии не всегда способны решить эти задачи удовлетворительно, в то время как фрактальная параметризация позволяет охарактеризовать не только морфологию поверхности образцов, но и процессы изменения морфологии под действием внешних воздействий.

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Объектами исследования служили порошки нативной монтмориллонит содержащей глины, химический состав которой приведен в табл. 1.

Для исследования СВЧ-воздействия на морфологию частиц глины использовали три партии порошков: полидисперсную А и две монодисперсных В и С. Партия А состояла из частиц с эффек-

тивными диаметрами  $d$ , лежащими в диапазоне 630÷40 мкм. Средние диаметры частиц в монодисперсных партиях В и С составляли, соответственно, 630÷500 и 100÷40 мкм. Все партии порошков обработали СВЧ-излучением мощностью 700 Вт с частотой 24.45 ГГц. Время СВЧ-воздействия на полидисперсную систему составляло 5, 10 и 20 минут, а на монодисперсные — 10 и 20 минут.

**Таблица 1.** Химический состав нативной глины [4]

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	ппп, %	Σ, %
55.9	9.51	0.86	18.63	0.72	2.05	1.9	3.24	7.08	99.89

На первом этапе результаты воздействия СВЧ-излучения на дисперсные глинистые частицы оценивали по морфологическим изменениям, происходящим в дисперсной системе в целом. Для порошков партии А проводили гранулометрический анализ (рассев на 4 фракции) до и после СВЧ-облучения. Содержание частиц во фракциях оценивали по массе, измеренной на электронных весах ВЛТ-200 с погрешностью ±0.001 г, погрешность определения значений потери массы  $dm/m$  не превышает 0.01 %.

Макроскопические изменения в дисперсных системах в результате воздействия СВЧ-излучения требуют анализа на различных иерархически-микроструктурных уровнях. С этой целью были использованы фрактальные (мультифрактальные) методы исследования морфологии глинистых частиц до и после нагрева в СВЧ-печи по их оптическим изображениям.

Фрактальный анализ морфологии дисперсных образцов проводили с использованием программы ImageJ и дополнительного модуля FracLac 2.5 [5]. Определение фрактальной размерности выполняется методом сеток, при котором изображение объекта разбивается на множество ячеек заданных размеров. Сканирование изображения дисперсных систем осуществляется за несколько циклов, при этом на каждом последующем цикле размеры ячеек сетки увеличиваются. Фрактальная размерность анализируемого объекта вычисляется по формуле [6]:

$$D_s = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln M(\epsilon)}{\ln \frac{1}{\epsilon}}, \quad (1)$$

где  $M(\epsilon)$  — минимальное число ячеек со стороны  $\epsilon$ , необходимых для покрытия всех элементов изображения.

Фрактальная размерность  $D_s$  определяется по наклону регрессионной линии, рассчитанной методом наименьших квадратов, в координатах  $\ln \epsilon = f(\ln M(\epsilon))$ . Среднестатистические значения фрактальной размерности получается путем изменения месторасположения точки отсчета для покрытия изображения поверхности сеткой.

Значимым параметром при описании стохастических фрактальных структур является лакунарность. Термин «лакунарность» был введен Мандельбротом [7] в качестве меры неоднородности заполнения пространства объектом. Мерой лакунарности ( $\Lambda$ ) является изменение плотности изображения образца при сканировании сеткой с ячейками различных размеров. Для ее расчета используется следующая формула [7]:

$$\Lambda = \left( \frac{\sigma}{\mu} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — стандартное отклонение единичных элементов изображения образца в ячейках сетки заданного размера  $\epsilon$ ;  $\mu$  — среднее значение единичных элементов изображения образца в ячейках заданного размера  $\epsilon$ .

Как и фрактальная размерность, лакунарность определяется по наклону регрессионной линии в координатах  $\ln \epsilon = f(\ln \Lambda)$ .

При установлении корреляции фрактальной размерности образца с процессами, происходящими при СВЧ-воздействиях, может возникнуть сложность в распознавании неоднородных фрактальных объектов — мультифракталов, содержащих подмножества элементов, каждое из которых имеет свою фрактальную размерность. Как было показано ранее [8], вариации значений фрактальных размерностей для порошков, состоящих из частиц

глинистых минералов, позволяют контролировать изменения величины удельной поверхности систем, установить образование самоупорядоченных структур. Кроме того, для более точного анализа геометрических объектов уместно использовать функцию мультифрактального спектра  $f(\alpha(q))$ , представляющую собой Хаусдорфову размерность некоторого однородного фрактального подмножества из исходного множества, которое вносит доминирующий вклад при заданной величине  $q$  [6, 9]:

$$f(\alpha(q)) = q \cdot \alpha(q) - \tau(q), \quad \alpha(q) = \frac{d\tau(q)}{dq}, \quad (3)$$

где  $q$  — показатель сингулярности, который может принимать любые значения в диапазоне от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

Здесь  $\tau(q)$  — нелинейная функция, показывающая насколько исследуемое множество точек является неоднородным, равная:

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left( \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \varepsilon} \right), \quad (4)$$

где  $p_i$  — относительная заселенность, т. е. вероятность попадания точки в ячейку  $i$  с размером  $\varepsilon$ . Так, при  $q \rightarrow -\infty$  основной вклад в сумму вносят ячейки с малой относительной заселенностью  $p_i$ , а при  $q \rightarrow +\infty$  — ячейки с наибольшим числом точек;  $N$  — число ячеек.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние СВЧ-излучения на полидисперсную систему А можно оценить с помощью гранулометрического анализа по изменению содержания частиц в двух представительных фракциях — Ф2 и Ф3. Результаты изменения фракционного состава глины приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Изменение фракционных составов после СВЧ-обработки в течение 5, 10 и 20 минут

Фракция, №	Средний размер частиц $d$ , мкм	Масса фракции $m_{исх}$ , %	Потеря массы $dm/m$ , %		
			5 мин	10 мин	20 мин
Ф1	$\geq 630$	0.8	0.28	0.18	1.06
Ф2	630—160	76.53	1.45	9.51	11.26
Ф3	160—40	22.38	-1.13	-9.87	-9.89
Ф4	$< 40$	0.25	0.09	0.33	0.22

Видно, что за счет агломерации растет масса более крупных частиц (Ф2) и уменьшается доля частиц в Ф3. При этом заметна следующая зависимость процесса агломерации от времени действия СВЧ: с увеличением времени от 5 до 10 минут агломерация активно развивается, увеличение времени действия СВЧ-до 20 минут картину практически не меняет. Общая потеря массы глиной адсорбированной воды увеличилась от 3.5 до 5.5 % с увеличением времени действия СВЧ-излучения. Температура образцов в СВЧ-камере составляла 160—170 °С после 5 минут и 180—190 °С после 10 и 20 минут нагрева. Изменения массы частиц, составляющих фракции Ф1 и Ф4, невелики, соизмеримы с погрешностями эксперимента.

Воздействие СВЧ-излучения на исследуемые системы приводит к формированию структуры, которую можно рассматривать как иерархичную, удовлетворяющую свойству самоподобия, то есть

фрактальную. На рис. 1 приведены изображения поверхностей порошков полидисперсной системы А, полученные до (рис. 1а) и после СВЧ-обработки в течение 10 (рис. 1б) и 20 (рис. 1в) минут.

На рис. 1а видны частицы осколочной формы, «облепленные» после 10 минут воздействия СВЧ-излучения мелкими частичками (рис. 1б), и агломераты, разделенные механическими трещинами после 20-минутного действия СВЧ-излучения (рис. 1в). Поверхности образцов имеют развитый рельеф и нерегулярное строение. Значение фрактальной размерности составило от 2.826 до 2.852, т. е. имеет величину метрической размерности, превосходящую топологическую. По мере увеличения изображения значения фрактальной размерности не меняются, это означает, что образцы обладают неизменностью основных геометрических особенностей при изменении масштаба, т. е. имеют фрактальную структуру (природу).



Рис. 1. Изображения поверхностей полидисперсной системы А: исходный образец (а), 10 минут (б) и 20 минут (в) воздействия СВЧ-излучения

Для всех партий установлена зависимость фрактальной размерности от времени СВЧ-обработки.

На рис. 2а в качестве примера приведена зависимость параметра  $D_s$ , рассчитанного по формуле (1), для партии А.

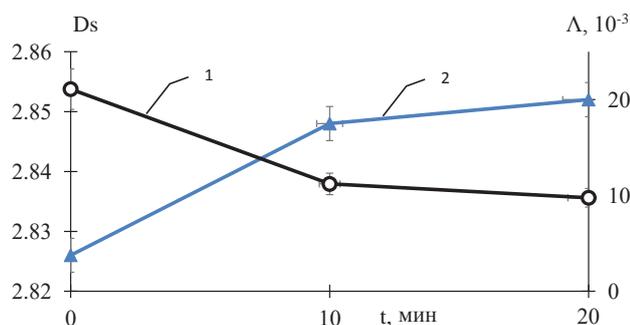


Рис. 2. Зависимости фрактальной размерности  $D_s$  и лакуарности  $\Lambda$  алюмосиликатных частиц партии А от времени воздействия СВЧ-излучения:

$$1 - \Lambda, 2 - D_s$$

Увеличение фрактальной размерности связано, по нашему мнению, с процессом агломерации частиц порошка под действием СВЧ-излучения.

За счет фрактальности структуры образцов происходит локальное увеличение напряженности электромагнитного поля. Неоднородность СВЧ-поля приводит к появлению пондеромоторных сил, пропорциональных градиенту квадрата амплитуды

поля  $-\nabla|\vec{E}|^2$ . Под действием этих сил заряженные

частицы выталкиваются из областей с высокой напряженностью электромагнитного поля в области с низкой напряженностью  $E$  [10]. Как следствие, происходит агломерация взаимодействующих частиц — их определенное пространственное распределение, т. е. самоорганизация.

Образование агломератов в первые 10 минут можно описать моделью DLA (diffusion limited aggregation) [7] или иначе ДКА (диффузионно-контролируемая агрегация) [10]. В соответствии с этой моделью агломерат растет за счет присоединения дисперсных одиночных частиц. Возникающий в таких условиях агломерат обладает плотной структурой. Образование таких агломератов приводит к уплотнению образца и, как следствие, росту фрактальной размерности.

При более длительном воздействии происходит вовлечение в процесс роста уже сформированных агломератов, и на первый план выходит другая модель агломерации — модель ССА (cluster — cluster aggregation) [7] или иначе ККА (кинетически-контролируемая агрегация) [10]. На этом масштабном уровне кластерный агломерат формируется путем объединения более мелких агломератов. Эти агломераты имеют более рыхлое строение, чем в модели ДКА, что и сказывается на уменьшении скорости роста фрактальной размерности.

Образования агломератов на разных этапах по моделям ДКА и ККА подтверждается рис. 2б, где показана зависимость лакуарности, рассчитанной по формуле (2), партии А от режимов СВЧ-обработки.

Чем выше лакуарность, тем больше в изучаемом распределении имеется пустых областей. В первые 10 минут СВЧ-обработки, когда элементами уплотнения являются отдельные частицы, заметно уменьшается количество пустых областей, т. е. лакуарности. При образовании рыхлых агломератов по модели ККА, когда элементами уплотнения являются фрактальные агломераты, значение лакуарности практически не изменяется.

Корреляция между эффективным размером частиц и фрактальными параметрами в результате СВЧ-воздействия установлена на примерах партий В и С. Максимальная потеря массы для них

составила 4.5 и 6 %, соответственно, а температура нагрева — 190 и 210 °С. Удаление капиллярной воды из системы приводит к фрагментации частиц и образованию микропористости. Первый процесс можно оценить по изменению фрактальности, а второй — лакуарности.

Влияние размеров агломерирующих частиц на изменение фрактальной размерности лакуарности дисперсных систем при воздействии СВЧ установлено для фракций В и С после 20-минутной обработки; результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3. Фрактальные параметры порошков партий В и С

Фрактальные параметры	Фракция			
	В		С	
	исходная	после СВЧ	исходная	после СВЧ
Морфология частиц				
Фрактальная размерность, $D_s$ ср.	2.865±0.001	2.865±0.001	2.856±0.001	2.873±0.001
Лакуарность, $\Lambda$ ср.	0.031±0.001	0.026±0.001	0.021±0.001	0.013±0.001

Мелкие частицы монодисперсной системы С агломерируют по модели ДКА, о чем свидетельствует увеличение фрактальной размерности. При СВЧ-обработке более крупных частиц партии В значение  $D_s$  сохраняется, поскольку частицы агломерируют согласно модели ККА. Одновременно происходит трансформация морфологии агломератов, на что указывает уменьшение лакуарности как для партии В, так и для С.

Дальнейшее исследование самоорганизации дисперсных структур проводили с использованием концепции мультифракталов. Характер эволюции микроструктуры образцов в зависимости от длительности СВЧ-воздействия можно наблюдать, анализируя мультифрактальные спектры полидисперсной партии А, рассчитанные по формулам (3—4), представленные на рис. 3.

Если  $\alpha(q) \leq \alpha_{\min}(2)$ , то основной вклад в значения  $f(\alpha(q))$  вносят ячейки с максимальной вероятностью заполнения. Если  $\alpha(q) > \alpha_{\max}(2)$ , то за правую часть спектра отвечают ячейки с минимальной заселенностью.

Кривые зависимости на рис. 3 иллюстрируют устойчивую тенденцию изменения мультифрактальных спектров при увеличении времени воздействия СВЧ-излучения. Наиболее заполненные ячейки стягиваются к множеству точек с фракталь-

ной размерностью 1.5, причем с ростом времени воздействия величина размерности возрастает. Ячейки, являющиеся областями образованных агломератов, растут, а их границы становятся более развитыми. Наименее заполненные ячейки стягиваются к множеству точек, фрактальная размер-

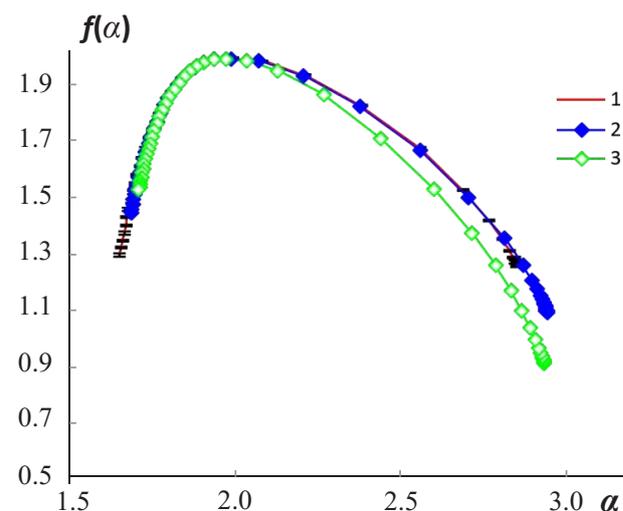


Рис. 3. Эволюция мультифрактальных спектров полидисперсных порошков глины при увеличении времени СВЧ-обработки:

1 — исходный образец; 2, 3 — 10 и 20 минут

ность которых стремится в пределе к нулю (евклидова размерность точки). Доля наименее заселенных ячеек уменьшается, указывая на уплотнение структуры за счет агломерации.

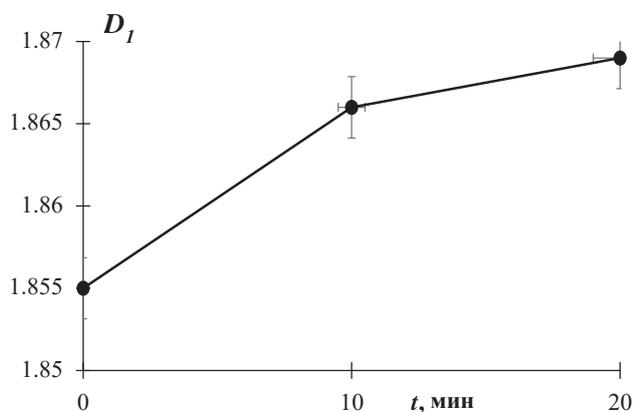
Изменение значений  $f(\alpha_{\min})$  и  $f(\alpha_{\max})$  в результате СВЧ-воздействия представлено в табл. 4.

**Таблица 4.** Изменение мультифрактальной размерности  $f(\alpha(q))$  в результате СВЧ-воздействия

Время воздействия, мин.	$f(\alpha_{\min})$	$f(\alpha_{\max})$
0	1.2146	1.2020
10	1.3610	1.0138
20	1.4441	0.8304

Процессы агломерации, происходящие в образцах при СВЧ-воздействии, можно подтвердить согласованными изменениями эффективного параметра однородности  $f(\alpha(q))=f(\alpha_{\min})$  при  $q \gg 1$ , рассчитанного по формулам (3—4), и информационной размерности  $D_1$  [9]. Чем больше значение  $f(\alpha_{\min})$ , тем более однородна структура (табл. 4) [6]. Под степенью однородности понималась не традиционная качественная характеристика внешнего вида структуры, а показатель характера распределения единичных элементов, соответствующих точкам разной интенсивности на изображении поверхности образцов.

Информационная размерность или информационная энтропия  $D_1$  характеризует информацию, необходимую для определения местоположения точки в некоторой ячейке. На рис. 4 приведена зависимость значений  $D_1$  от времени воздействия СВЧ-излучения.



**Рис. 4.** Зависимость информационной энтропии для порошков партии А от времени воздействия СВЧ-излучения

Энтропия системы возрастает, что свидетельствует о движении системы к равновесному состоянию. Подобное поведение системы представляет собой процесс самоорганизации, в ходе которого могут возникать структуры различной сложности.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали следующее:

- сопоставление результатов традиционного гранулометрического анализа и фрактальных методов структуры показало, что СВЧ-обработка частиц глинистых минералов приводит к их агломерации. В процессах агломерации можно выделить 2 этапа, описываемых моделями ДКА и ККА;

- увеличение времени СВЧ-воздействия приводит к росту фрактальной размерности и снижению лакуарности в 1.3—1.5 раз за счет уплотнения системы;

- мультифрактальные параметры имеют достаточно высокую чувствительность к структурным изменениям и могут быть использованы для анализа процессов агломерации.

Привлечение концепции фракталов позволит изучить законы образования и свойства различных сложных систем для создания материалов с заданными физическими свойствами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Egorov S. V., Rybakov K. I., Semenov V. E., Bykov Yu. V., Kanygina O. N., Kulumbaev E. B., Lel'evkin V. M. // *J. of Materials Science*, 2007, vol. 42, № 6, pp. 2097—2104.
2. Женжурист И. А. // *Строительные материалы*, 2015, № 4, с. 60—63.
3. Прохина А. В., Шаповалов Н. А., Латыпова М. М. // *Современные наукоемкие технологии*, 2011, № 1, с. 135—136.
4. Анисина И. Н., Четверикова А. Г., Каныгина О. Н. // *Материаловедение*, 2012, № 12, с. 48—52.
5. Программный модуль *FracLac 2.5* [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/fracLac/FLHelp/Introduction.htm> (дата обращения: 20.04.2016).
6. Встовский Г. В. *Элементы информационной физики*. М.: МГИУ, 2002, 260 с.
7. Мандельброт Б. *Фрактальная геометрия природы: пер. с англ.* М.: Ин-т компьютерных исслед., 2002, 656 с.
8. Каныгина О. Н., Четверикова А. Г., Филяк М. М., Огерчук А.А // *Стекло и керамика*, 2015, № 12, с. 11—16.
9. Божокин С. В., Паршин Д. А. *Фракталы и мультифракталы*. Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 128 с.

10. Ролдугин В. И. // *Успехи химии*, 2003, № 72 (11), с. 1027—1054.

11. Олемской А. И., Флат А. Я. // *Успехи физических наук*, 1993, т. 163, № 12, с. 2—50.

12. Tombacz E., Csanaky C., Illes E. // *Colloid & polymer Science*, 2001, vol. 279, № 5, pp. 484—492.

## FRACTAL FORMALISM AS APPLIED TO THE ANALYSIS OF THE MICROWAVE MODIFICATION OF DISPERSE SYSTEMS

© 2016 M. M. Filyak, A. G. Chetverikova, O. N. Kanygina, L. S. Bagdasaryan

Orenburg State University, Pobedy pr., 13, 460018 Orenburg, Russia

e-mail: KR-727@mail.ru

Received 05.07.2016

**Abstract.** The result of microwave radiation exposure on the dispersed system composed of particles of natural clay was estimated by the granulometry and fractal parameterization methods. Fractal analysis of the morphology of particles on digital images of the samples using the software module FracLac 2.5 was conducted. The observed increase in fractal dimension  $D_s$  from 2.824 to 2.873 and decrease of lacunarity values  $\Lambda$  from 0.021 to 0.0098 under the influence of microwave radiation are associated with agglomeration of the particles, proceeding in two stages, described by models DLA (diffusion limited aggregation) and CCA (cluster — cluster aggregation). The kind of evolution of microstructure of samples, depending on duration of microwave radiation, was investigated by analysis of multifractal spectra. On the basis of multifractal parameters changes was established that the degree of the morphological evolution of particles is directly proportional to the time of exposure to microwave radiation.

**Keyword:** fractal dimension, lacunarity, dispersed system, microwave radiation, particle morphology, aluminosilicates.

### REFERENCES

1. Egorov S. V., Rybakov K. I., Semenov V. E., Bykov Yu. V., Kanygina O. N., Kulumbaev E. B., Levkin V. M. *J. of Materials Science*, 2007, vol. 42, no. 6, pp. 2097—2104. DOI 10.1007/s10853—006—0157-x. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10853—006—0157-x#page-1>

2. Zhenzhurist I. A. *Stroitel'nye materialy*, 2015, no. 4, pp. 60—63.

3. Prohina A. V., Shapovalov N. A., Latypova M. M. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2011, no. 1, pp. 135—136.

4. Anisina I. N., Chetverikova A. G., Kanygina O. N. *Materialovedenie*, 2012, no. 12, pp. 48—52.

5. *Software modulus FracLac 2.5* [Electronic source]: Access mode: <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/fraclac/FLHelp/Introduction.htm> (accessed date: 20.04.2016).

6. Vstovsky G. V. *Elements of Information Physics*. Moscow, MGIU Publ., 2002, 260 p.

7. Benoit B. Mandelbrot *The Geometry of Nature: Russian Translation*. Moscow, Institute of Computer Science Publ., 2002, 656 p.

8. Kanygina O. N., Chetverikova A. G., Filyak M. M., Ogerchuk A. A. *Steklo i Keramika* [Glass and Ceramics]. 2016, no. 72 (11—12), pp. 444—448. DOI: 10.1007/s10717—016—9807-x. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10717-016-9807-x>

9. Bozhokhin S. V., Parshin D. A. *Fraktaly i mul'tifraktaly*. Izhevsk, NITs «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika» Publ., 2001, 128 p.

10. Roldughin V. I. *Russian Chemical Reviews*, 2003, no. 72 (11), pp. 913—937. DOI: 10.1070/RC2003v072n11ABEH000829. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=13424701>

11. Olemskoi A. I., Flat A. Ya. *UFN* [Physics-Uspekhi], 1993, vol. 136, no. 12, pp. 1087—1128. DOI: 10.1070/PU1993v036n12ABEH002208. Available at: <http://ufn.ru/en/articles/1993/12/a/>

12. Tombacz E., Csanaky C., Illes E. *Colloid & polymer Science*, 2001, vol. 279, no. 5, pp. 484—492.

*Филяк Марина Михайловна* — к. т. н., доцент кафедры промышленной электроники и информационно-измерительной техники, Оренбургский госуниверситет; тел.: +7 (3532) 372874, e-mail: [filyak@mail.ru](mailto:filyak@mail.ru)

*Четверикова Анна Геннадьевна* — к. ф.-м. н., доцент, декан физического факультета, Оренбургский госуниверситет; тел.: +7 (961) 9378459, e-mail: [kr-727@mail.ru](mailto:kr-727@mail.ru)

*Каныгина Ольга Николаевна* — д. ф.-м. н, профессор, профессор кафедры общей физики, Оренбургский госуниверситет; тел. +7 (3532) 372439, e-mail: [oncan@mail.ru](mailto:oncan@mail.ru)

*Багдасарян Лукаш Смбаатович* — студент кафедры биофизики и физики конденсированного состояния, Оренбургский госуниверситет; тел.: +7 (3532) 372801, e-mail: [lukash333@mail.ru](mailto:lukash333@mail.ru)

*Filyak Marina M.* — Cand. Sci. (Eng.), Docent of the Department of Industrial Electronics and Informing and Measuring Techniques, Orenburg State University; ph.: +7 (3532) 372874, e-mail: [filyak@mail.ru](mailto:filyak@mail.ru)

*Chetverikova Anna G.* — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Dean of the Physics Department, Orenburg State University; ph.: +7(961) 9378459, e-mail: [kr-727@mail.ru](mailto:kr-727@mail.ru)

*Kanygina Olga N.* — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Professor of the Department of General Physics, Orenburg State University, ph.: +7 (3532) 372439, e-mail: [oncan@mail.ru](mailto:oncan@mail.ru)

*Bagdasaryan Lukash S.* — student of the Department of Biophysics and Condensed matter physics, Orenburg State University; ph.: +7 (3532) 372801, e-mail: [lukash333@mail.ru](mailto:lukash333@mail.ru)