

А.В. Белко, А.В. Никитин, А.А. Скаскевич, А.Ю. Бачурина, С.И. Саросек

МОДЕЛИ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР В КОМПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРОВ

Во введении указан объект исследования – композиционные материалы на основе полимеров. Рассмотрены методы моделирования структуры наполнителей в матрице композиционного материала. Целью исследования является разработка моделей формирования структуры кластеров наполнителя композиционного материала. В основной части представлена модификация модели агрегации, ограниченной диффузией, и модели кластерной агрегации, ограниченной диффузией, с учетом вероятности прилипания диффундирующей частицы и конфигурации частиц кластера в зоне прилипания. Показано, что зависимость фрактальной размерности от вероятности прилипания можно сопоставить с экспериментально полученной зависимостью фрактальной размерности от температуры. Это позволяет установить корреляцию между вероятностью прилипания и температурой отверждения, по крайней мере, для композиционных систем с агрегатами наполнителя (обработанный и необработанный стеариновой кислотой никелевый порошок) в полимерной матрице (эпоксидная смола). Модель агрегации, ограниченной диффузией, и модель кластерной агрегации, ограниченной диффузией, и их модификации позволяют количественно определить отношение модифицируемого объема матрицы композиционного материала к полному объему матрицы (степень модифицирования). Получены количественные оценки влияния фрактальной структуры кластеров наполнителя на степень модифицирования матрицы композиционного материала. Агрегация частиц приводит к уменьшению модифицирующего действия наполнителя. Уменьшение фрактальной размерности структуры наполнителя приводит к увеличению степени модифицирования матрицы композита при прочих равных условиях. Рассматривается структура распределения частиц меди в полимерной матрице политетрафторэтилена при различных концентрациях наполнителя. Полученные результаты и разработанные модели могут быть использованы для исследования теплопроводности композиционных систем на основе полимеров с металлическим наполнителем.

Ключевые слова: композиционный материал; наполнитель; матрица; модель агрегации, ограниченной диффузией, модель кластерной агрегации, ограниченная диффузией; фрактальные кластеры; фрактальная размерность.

Интерес к исследованию наполненных полимеров обусловлен широким применением их в производстве. Композиционные материалы – это материалы сложного состава, образующиеся путем объемного сочетания разнородных компонентов (фаз) с границей раздела между ними. Компонент, непрерывный в объеме композита, называется матрицей или связующим, другие компоненты композита распределены в матрице хаотично либо в заданном порядке и называются наполнителем [1]. Композиционные материалы обладают свойствами,

Белко Александр Витальевич, канд. физ.-мат. наук, доц., каф. информационных систем и технологий ГрГУ им. Янки Купалы (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: ул. Врублевского, 33, 230009, г. Гродно, Беларусь; e-mail: axela@inbox.ru

Никитин Александр Викторович, канд. техн. наук, доц., зав. каф. теоретической физики ГрГУ им. Янки Купалы (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: ул. Врублевского, 33, 230009, г. Гродно, Беларусь; e-mail: nik@grsu.by

Скаскевич Александр Александрович, канд. техн. наук, доц., зам. декана факультета инновационных технологий машиностроения ГрГУ им. Янки Купалы (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: ул. Комарова, 3, 230009, г. Гродно, Беларусь; e-mail: askas@grsu.by

Бачурина Анна Юрьевна, аспирант каф. общей физики ГрГУ им. Янки Купалы (Беларусь); науч. рук. – А.В. Никитин, канд. техн. наук, доц., зав. каф. теоретической физики ГрГУ им. Янки Купалы (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: ул. Врублевского, 33, 230009, г. Гродно, Беларусь; e-mail: a.bachurina@grsu.by

Саросек Станислав Иосифович, аспирант каф. общей физики ГрГУ им. Янки Купалы (Беларусь); науч. рук. – В.А. Лионю, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. теоретической физики ГрГУ им. Янки Купалы (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: ул. Врублевского, 33, 230009, г. Гродно, Беларусь; e-mail: s.sarosek@grsu.by

которые отличаются от свойств составляющих его компонентов. Важное значение имеет модификация структуры полимерной матрицы наполнителем. Модифицируемый слой в значительной степени определяет свойства всего композита.

В ходе изготовления дисперсионно-наполненных полимерных композитов часто происходит агрегация частиц наполнителя в более крупные агрегаты. Этот процесс определяет структуру и свойства композиционного материала [2–7]. Теория фракталов применяется как для описания структуры наполнителя, так и структуры полимерной матрицы [8; 9]. Модельные методы исследования в этом случае позволяют расширить диапазон изучения структур и свойств этих объектов, а также их кинетические параметры.

Среди моделей агрегации следует выделить модель «агрегации, ограниченной диффузией» (DLA, встречается также и название «модель Виттена-Сандера»). Сущность модели агрегации, ограниченной диффузией, заключается в следующем. В соответствии с этой моделью разъем ограниченное двухмерное пространство на множество квадратных ячеек, поместим в него одну частицу-затравку кластера и будем добавлять по одной пробной частице. Каждая новая частица передвигается в соседнюю клетку случайным образом. Если частица достигает границы пространства, она отражается от нее. Движение частицы продолжается до тех пор, пока она не окажется по соседству с одной из частиц кластера. Тогда она останавливается в данной ячейке, а в пространство запускается следующая. Таким образом, выращивается фрактальный кластер [10; 11].

Рассматриваемая модель агрегации, ограниченной диффузией, сыграла важную роль в исследованиях фрактальных кластеров, однако она является одним из способов сборки фрактального кластера. Эта модель может быть видоизменена. Можно отказаться от деления пространства на ячейки и, представлять каждую частицу в виде диска в двухмерном пространстве или в виде шара в трехмерном пространстве, задать ее траекторию в виде ломаной линии. При этом столкновение частицы с одной из частиц кластера приводит к их склеиванию. Пробная частица закрепляется на кластере, а в пространство запускается следующая частица. Описанная модель носит название нерешеточной модели, тогда как модель агрегации, ограниченной диффузией, – решеточной. Расчеты показывают, что в исследованных случаях результаты агрегации в обоих моделях совпадают в пределах их погрешностей.

Последующее изменение рассматриваемой модели может быть связано с введением вероятности того, что частицы при касании друг друга слипаются. Ранее эта вероятность полагалась равной 1. Эта модель носит название «ограниченная реакцией агрегации» (RLA или ORA).

Представленная модель агрегации, ограниченной диффузией, с различными модификациями отвечает определенным физическим условиям образования фрактального кластера, он собирается добавлением к нему отдельных частиц.

Многие реальные физические процессы хорошо описываются DLA-моделью. Это, прежде всего, электролиз, кристаллизация жидкости на подложке, осаждение частиц при напылении твердых аэрозолей.

Выполнена модификация модели агрегации, ограниченной диффузией, обеспечивающая учет вероятности прилипания диффундирующей частицы и конфигурации частиц кластера в зоне прилипания. Рассматриваются четыре варианта конфигурации частиц кластера и диффундирующей частицы и вводятся соответствующие им вероятности прилипания P_1 , P_2 , P_3 , P_4 . В первом варианте диффундирующая частица в момент прилипания контактирует только с одной частицей кластера. Другие варианты предусматривают контакт с более чем одной частицей кластера. Установлено, что на фрактальную размерность кластера оказывает существенное влияние только механизм прилипания в соответствии с первым вариантом. Минимальное значение диапазона изменения вероятности прилипания выбиралось с учетом оптимизации времени вычислений [12–17]. Выполненные вычислительные эксперименты и их статистическая обработка показали, что модель агрегации, ограниченной диффузией, и ее модификации позволяют получать фрактальные кластеры с фрактальной размерностью D .

в пределах от 1,63 до $1,93 \pm 0,03$ при изменении вероятности прилипания P_1 от 1 до 0,01 на двухмерной решетке (рисунок 1) и хорошо описывается зависимостью:

$$D = -0,067 \ln(P_1) + 1,63. \quad (1)$$

Трехмерная модель агрегации, ограниченной диффузией, позволила получить модельные кластеры с фрактальной размерностью D в пределах от 2,3 до $2,72 \pm 0,04$ при изменении вероятности прилипания P от 1 до 0,05 (рисунок 2). В этом случае зависимость фрактальной размерности кластера от вероятности прилипания имеет вид:

$$D = -0,14 \ln(P) + 2,32. \quad (2)$$

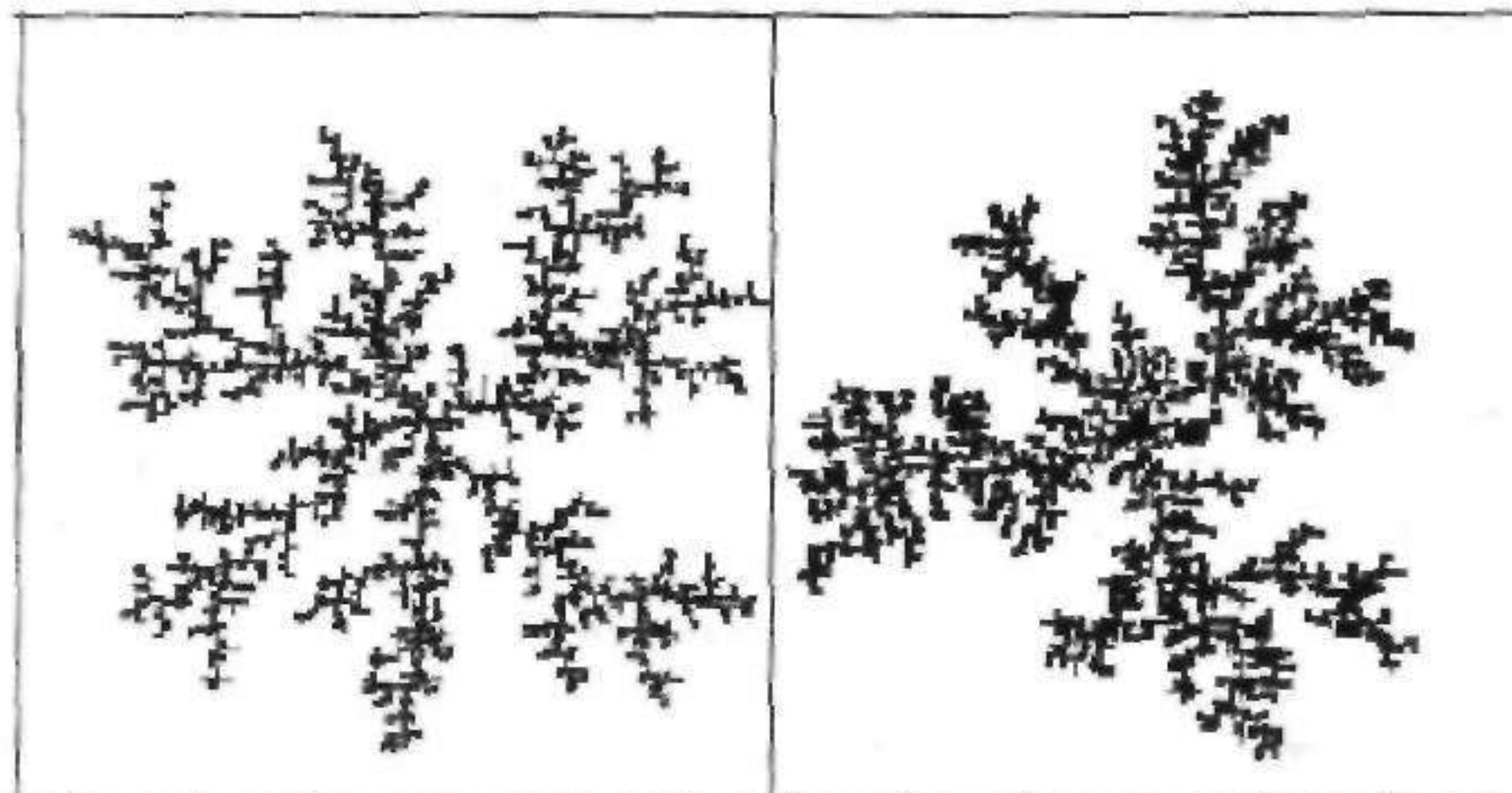


Рисунок 1 – Фрактальные кластеры, полученные в рамках модели агрегации, ограниченной диффузией, на двухмерных решетках при различных вероятностях прилипания: слева (1,0) и справа (0,2)

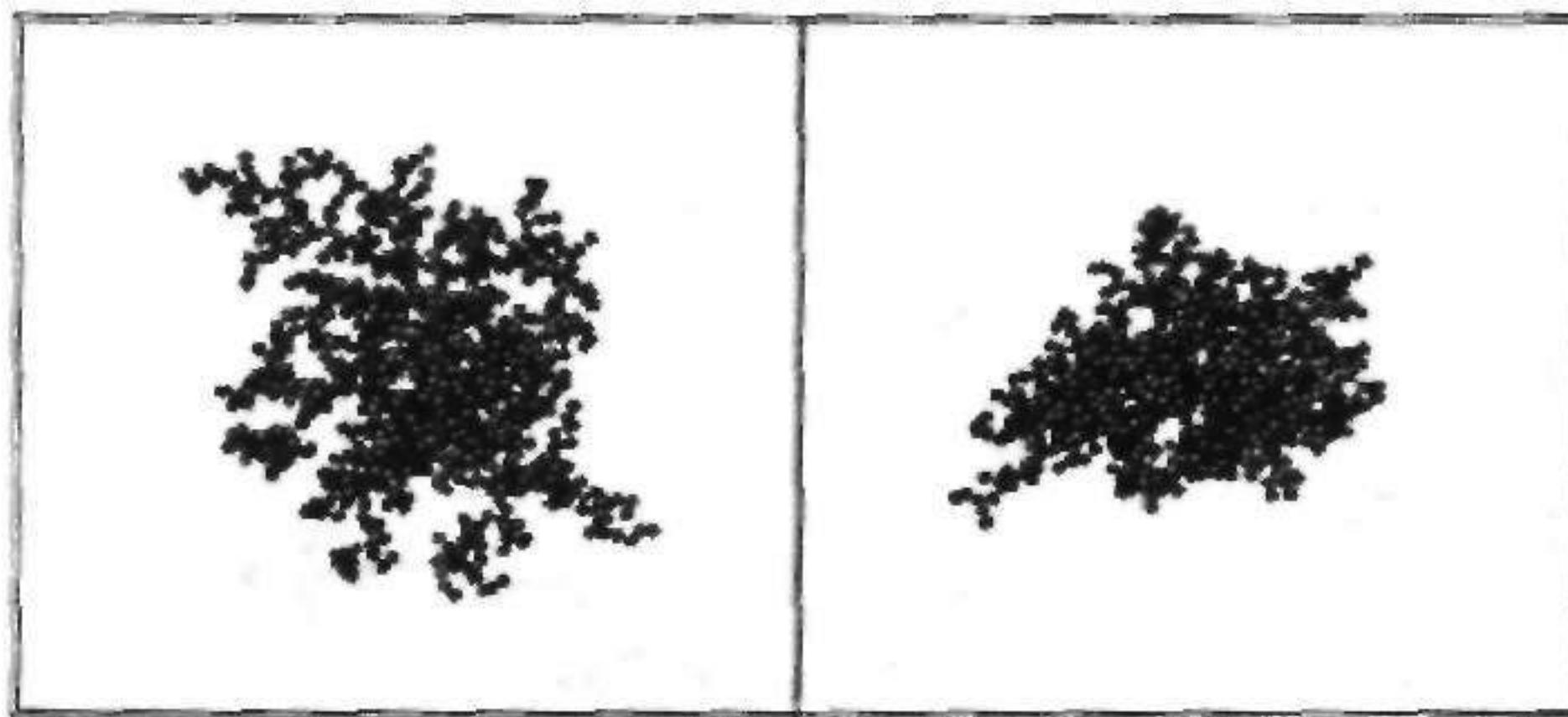


Рисунок 2 – Фрактальные кластеры, полученные в рамках модели агрегации, ограниченной диффузией, на трехмерных решетках при различных вероятностях прилипания: слева (1,0) и справа (0,1)

В работе [8] исследовались две серии композитов полигидроксиэфир – графит (неактивированный и активированный смесью серной и азотной кислот). Объемная концентрация графита в образцах менялась от 0,008 8 до 0,176. Для исследования структуры

сколов образцов композиционного материала использовался метод просвечивающей электронной микроскопии. Установлено, что структура наполнителя является фракталом в конечном интервале самоподобия. Значения фрактальной размерности структуры неактивированного и активированного наполнителей соответственно равны 2,45 и 2,79 [8]. Значения фрактальной размерности агрегатов близки к размерностям фрактальных кластеров, полученных в рамках модифицированной модели агрегации, ограниченной диффузией.

Другой моделью, которая также, как и модель агрегации, ограниченной диффузией, широко используется при моделировании фрактальных кластеров, является модель «кластерная агрегация ограниченная диффузией» (DLCA). Встречается и другое название этой модели – «кластер-кластерная агрегация» (CCA) [11]. В соответствии с этой моделью в начальный момент времени в объем помещается определенное число частиц, которые случайным образом перемещаются по объему, сталкиваются друг с другом и слипаются. Первоначально будет образовываться большое число малых кластеров. В дальнейшем столкновение кластеров приводит к их объединению в более крупные агрегаты. Со временем число кластеров в объеме уменьшается, а их размеры увеличиваются [18–20].

Образованные в результате этого процесса фрактальные кластеры будут более рыхлыми в сравнении с кластерами модели агрегации ограниченной диффузией. При таком способе образования кластера пустоты труднее заполнить.

Модель DLCA можно изменить, как и модель DLA, введением вероятности слипания кластеров при столкновении. Эта модель получила название «ограниченная реакцией кластерная агрегация» (RLCA).

Модель кластер-кластерной агрегации, ограниченной диффузией, и ее модификации позволяют получать модельные фрактальные кластеры с размерностью D от 1,42 до $1,55 \pm 0,04$ при изменении вероятности прилипания P от 1 до 0,01 на двухмерной решетке (рисунок 3) и описывается зависимостью:

$$D = -0,029 \ln(P) + 1,43. \quad (3)$$

Трехмерная модель для этого типа агрегации позволила получить модельные кластеры с фрактальной размерностью D от 1,82 до $2,01 \pm 0,04$ при изменении вероятности прилипания P от 1 до 0,05 (рисунок 4). Зависимость $D(P)$ имеет вид:

$$D = -0,05 \ln(P) + 1,82. \quad (4)$$

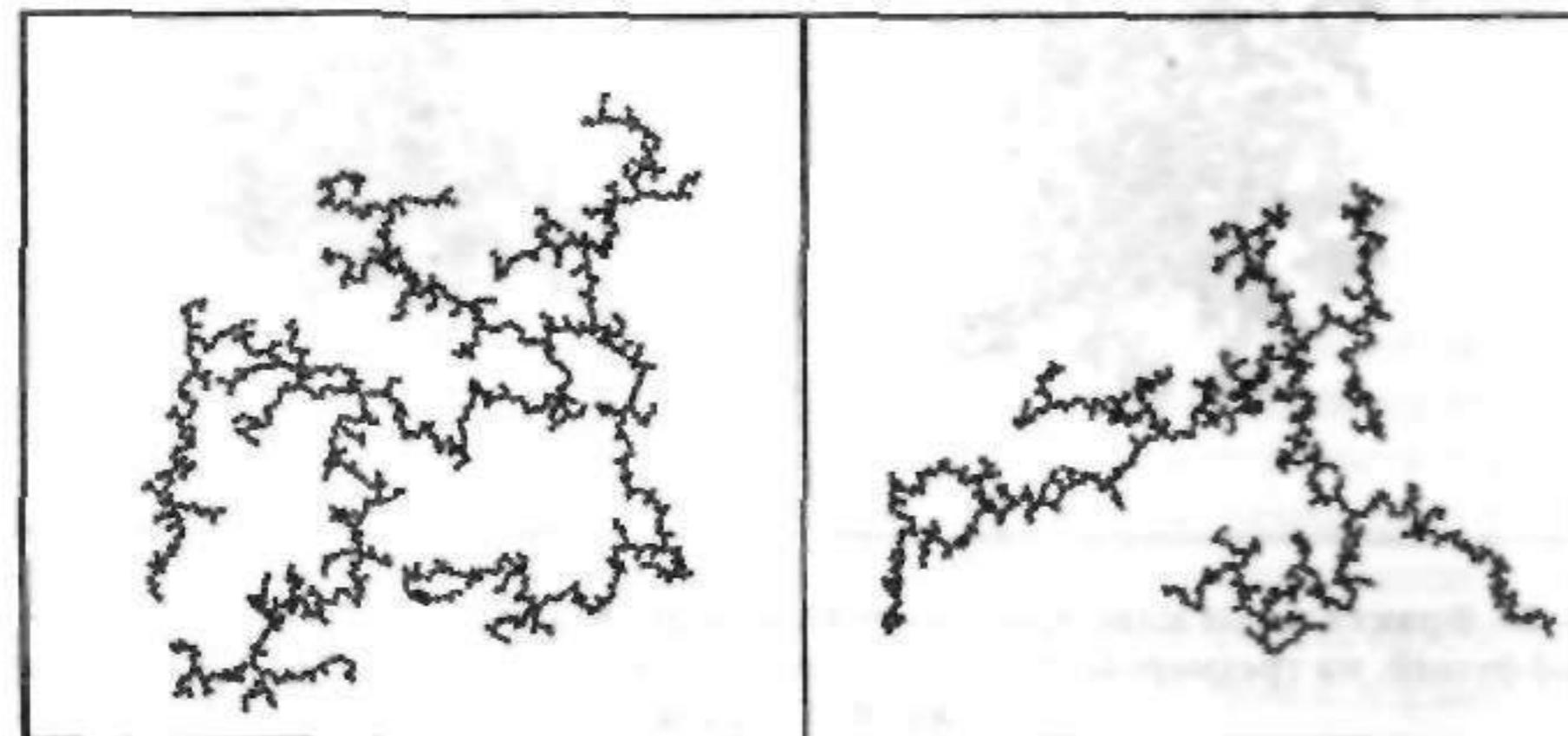


Рисунок 3 – Фрактальные кластеры, полученные в рамках модели кластерной агрегации, ограниченной диффузией, на двухмерных решетках при различных вероятностях прилипания: слева (1,0) и справа (0,1)

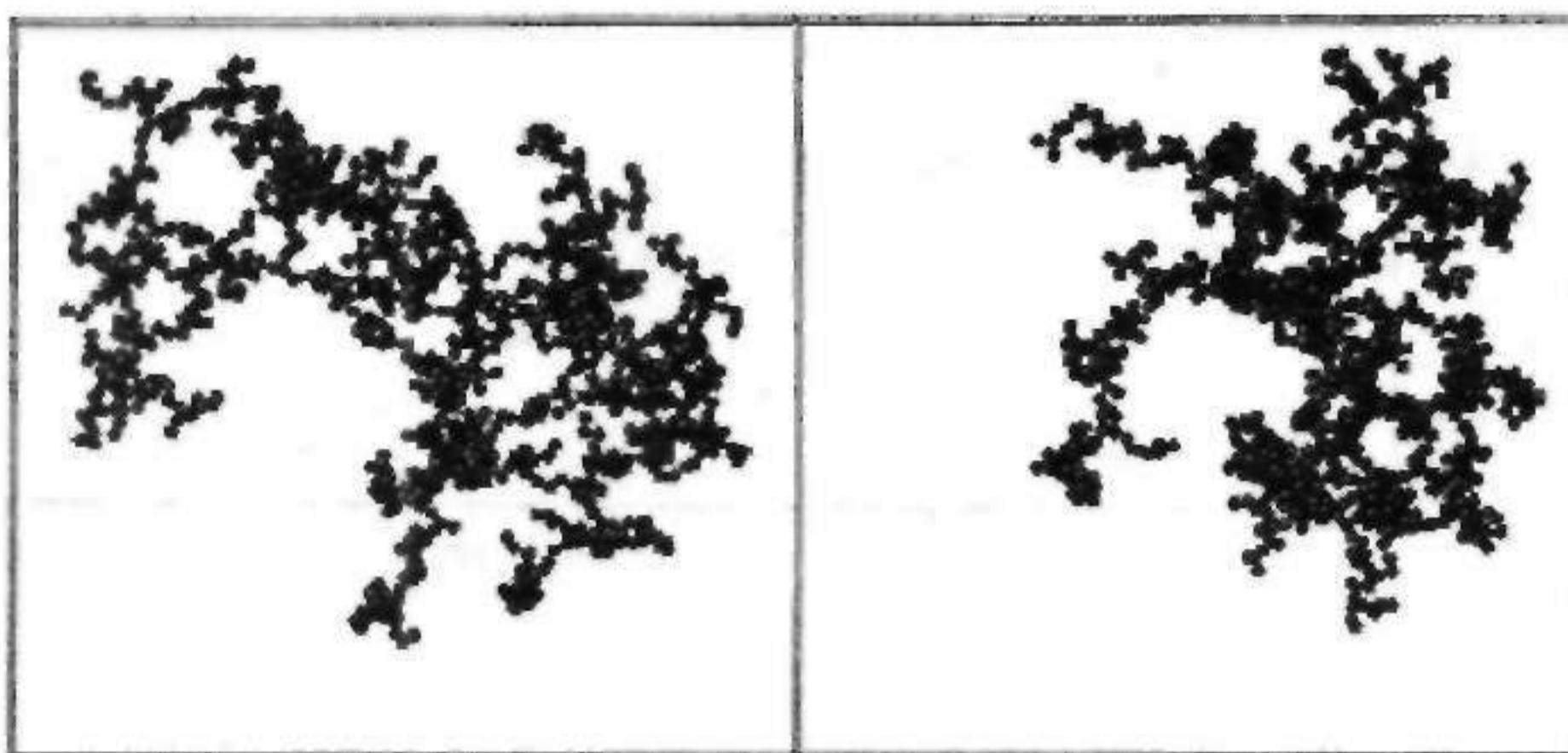


Рисунок 4 – Фрактальные кластеры, полученные в рамках модели кластерной агрегации, ограниченной диффузией, на трехмерных решетках при различных вероятностях прилипания: слева (1.0) и справа (0.1)

В работе [21] показана возможность моделирования агрегации частиц наполнителя в рамках модели кластер-кластерной агрегации. В качестве исследуемых образцов были использованы композиты полигидроксиэфир – графит. Для практического применения методики, изложенной в работе, необходимо установить корреляционные взаимосвязи между параметрами модели и технологическими характеристиками композитов.

В работах [22; 23] исследовалась агрегация частиц наполнителя (обработанный и необработанный стеариновой кислотой никелевый порошок) в полимерной матрице (эпоксидная смола). При увеличении температуры отвердевания композиции от 20 до 100 °С значения фрактальной размерности агрегатов обработанного порошка изменялись от 1.82 до 2.01. При увеличении температуры отвердевания композиции от 20 до 80 °С значение фрактальной размерности агрегатов необработанного порошка оставалось неизменным и равно 1,92. Значения фрактальной размерности агрегатов хорошо согласуются со значением фрактальной размерности модельных кластеров, полученных при численном моделировании в рамках модели кластер-кластерной агрегации. Более высоким температурам соответствуют большие размеры агрегатов. Рост размеров агрегатов связан с понижением вязкости полимерной матрицы при увеличении температуры.

В предыдущих расчетах использовалась «вероятность прилипания». Этот параметр вводился формально, что позволило формировать кластеры с различной размерностью. Для придания этому параметру физического смысла рассмотрим зависимость фрактальной размерности кластеров никеля в матрице эпоксидной смолы от температуры [22; 23]. Расчетная зависимость фрактальной размерности от вероятности прилипания аппроксимируется выражением (4). Сопоставление этой зависимости с экспериментально полученной зависимостью фрактальной размерности от температуры позволяет установить корреляцию между вероятностью прилипания и температурой отверждения, по крайней мере, для композиционных систем с агрегатами наполнителя (обработанный и необработанный стеариновой кислотой никелевый порошок) в полимерной матрице (эпоксидная смола) (рисунок 5).

В работах [22, 23] установлено, что структура наполнителя имеет фрактальный характер и представляет собой кластер с фрактальной размерностью 1,82 – 2,01. Подобные структуры наполнителя можно рассчитать в рамках модифицированной модели кластер-кластерной агрегации. Кроме того, установлена корреляция между вероятностью прилипания и физическим параметром – температурой отверждения.

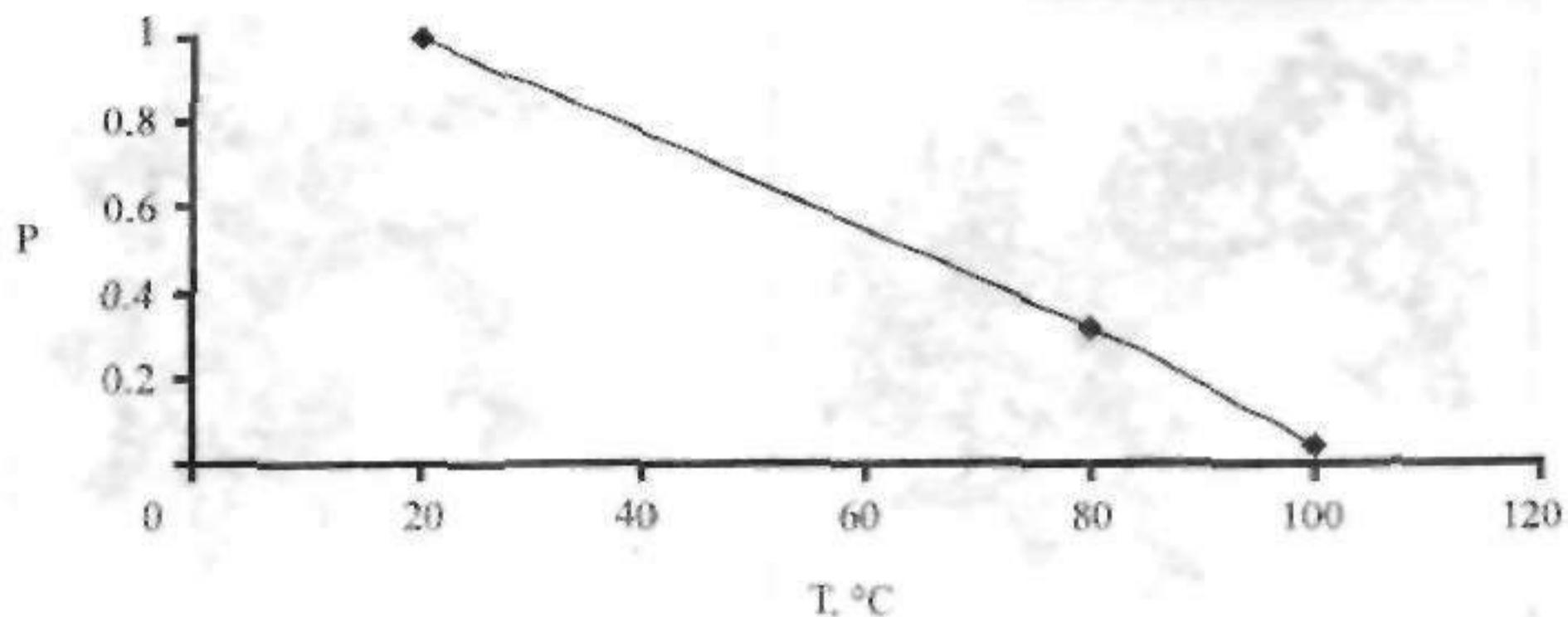


Рисунок 5 – Зависимость вероятности от температуры отверждения композиционного материала

В работах [24; 25] проведены расчеты, позволяющие установить влияние фрактальной структуры наполнителя на модифицируемый объем композита. С помощью модифицируемой модели ограниченной диффузии агрегации, модели ограниченной диффузии кластер-кластерной агрегации и их модификаций смоделированы матрицы с фрактальной структурой наполнителя. В работе рассчитана методом Монте-Карло отношение модифицированного объема матрицы к полному объему матрицы (степень модифицирования μ) с модификатором, имеющим фрактальную структуру с радиусом модифицирования 20, 30, 50, 100 нм. Радиус частиц кластера 10 нм. При изменении фрактальной размерности структуры наполнителя: от 1,82 до 2,42 (концентрация 0,5 %) степень модифицирования μ уменьшалась от 0,21 до 0,08 при радиусе модифицирования, равном 100 нм; от 1,92 до 2,58 (концентрация 2 %) степень модифицирования μ уменьшалась от 0,65 до 0,19 при радиусе модифицирования, равном 100 нм; от 2,14 до 2,62 (концентрация 5 %) степень модифицирования μ уменьшалась от 0,9 до 0,39 при радиусе модифицирования, равном 100 нм. Агрегация частиц приводит к уменьшению модифицирующего действия наполнителя. Уменьшение фрактальной размерности структуры наполнителя приводит к увеличению степени модифицирования матрицы композита.

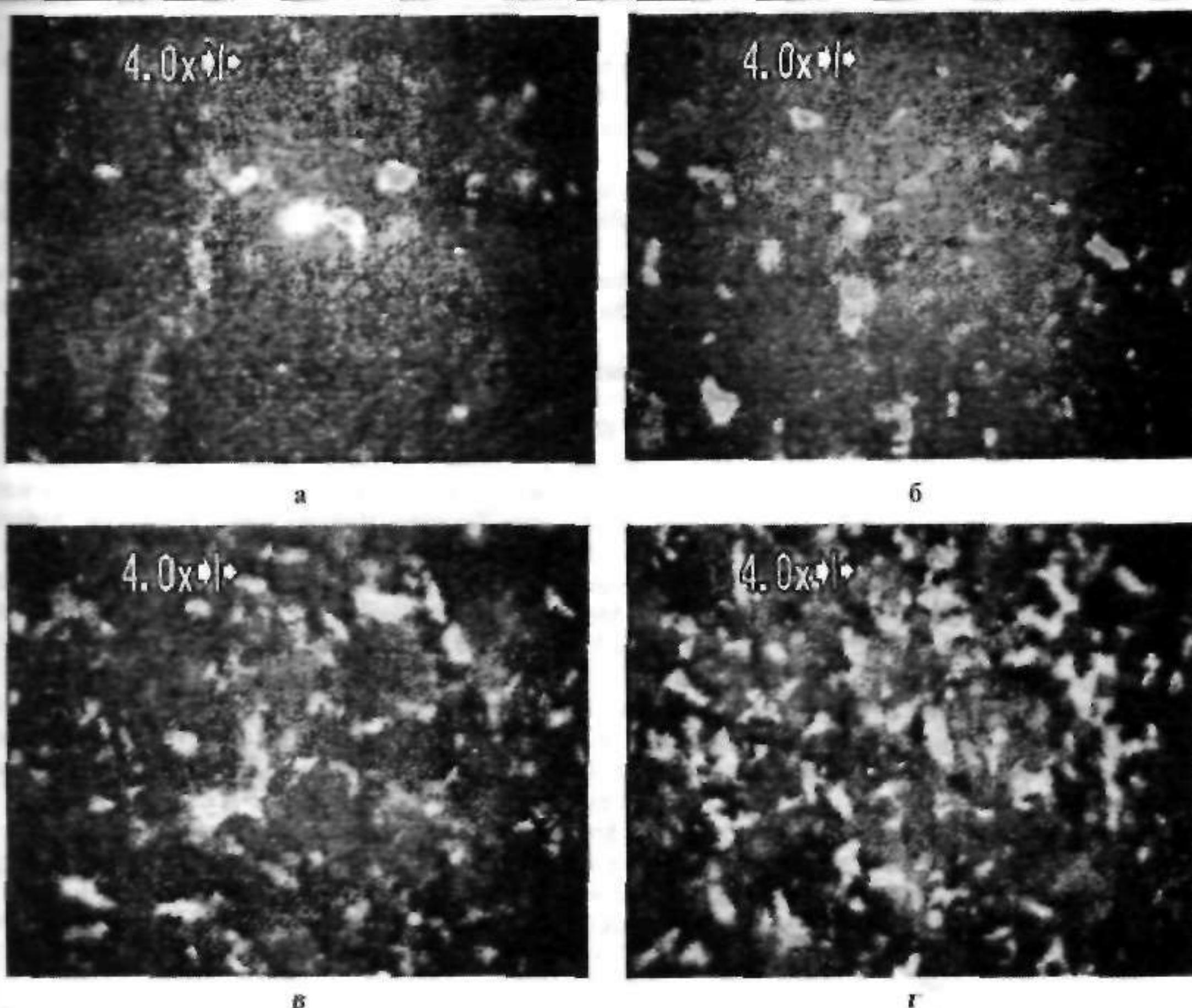
В качестве объектов исследований использовали политетрафторэтилен (ПТФЭ) марки Ф4-ЛМ (ГОСТ 10007-80). В качестве модификатора использовали порошок медный электролитический высокодисперсный (ТУ 1793-094-00194429-2002). Предварительно просушенные до содержания летучих продуктов не более 0,05 мас. % компоненты смешивали в заданных соотношениях в тихоходном лопастном смесителе в течение 5 мин. Содержание модификатора изменяли в пределах 1–20 мас. %.

Образцы для исследований теплофизических характеристик полимерных композитов в виде втулок получали методом прессования с последующим их спеканием при параметрах, характерных для переработки исходного ПТФЭ. По причине окисления меди в поверхностных слоях при термообработке полимерных заготовок из полученных полуфабрикатов вырезали диски необходимого размера.

Для исследования характера распределения частиц модификатора в полимерной матрице образцы получали в процессе хрупкого разрушения втулок, охлажденных в жидком азоте.

Морфологию поверхности хрупкого разрушения исследовали на оптическом микроскопе ММВ-2200 «Carl Zeiss» с увеличением до ×400. На рисунке 6 представлена структура распределения частиц меди в полимерной матрице при различных концентрациях наполнителя.

Представленные на снимках образцы были использованы для исследования теплопроводности композиционных систем на основе полимеров с металлическим наполнителем. Была разработана методика расчета эффективной теплопроводности композиционных систем. Распределение наполнителя в композите моделировали с помощью описанных выше методов (RLA и RLCA). Далее выполнялся расчет эффективной теплопроводности [26].



Пояснения: а – 1 мас. %; б – 3 мас. %; в – 10 мас. %; г – 20 мас. %.

Рисунок 6 – Распределение частиц меди в полимерной матрице при концентрациях наполнителя

Анализ структуры распределения частиц меди в полимерной матрице при концентрациях наполнителя в пределах 1–20 мас. % показывает, что наполнитель образует кластеры, для описания структуры которых наиболее подходит модифицированная модель агрегации, ограниченной диффузией (RLA).

Заключение. Рассмотренные методы моделирования фрактальных кластеров можно использовать для моделирования структуры наполнителя в композиционных материалах. Применяемые методы моделирования позволяют варьировать структурой кластеров наполнителя с фрактальной размерностью от 1,6 до 2,7 и прогнозировать физические свойства (теплопроводность) композиционных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Наполнители для композиционных материалов // под ред. М. Каца, А. Менецкого. – М.: Химия, 1988. – 376 с.
- 2 Кулак, М.И. Фрактальная механика материалов / М.И. Кулак. – Минск: Высш. шк., 2002. – 304 с.
- 3 Flesch, J.C. Laminar and Turbulent Shear-Induced Flocculation of Fractal Aggregates / J.C. Flesch, R.T. Spicer, S.E. Pratsinis // Materials, Interfaces and Electrochemical Phenomena. – 1999. – Vol. 45, № 5. – P. 1114–1124.
4. Никитин, Д.А. Метод расчета коэффициента теплопроводности композиционной системы / Д.А. Никитин // Тез. докл. X Респ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов «Физика конденсированных сред». – Гродно: ГрГУ, 2002. – С. 239–240.
5. Никитин, Д.А. Метод релаксаций для исследования теплопроводности композиционных систем / Д.А. Никитин // Тез. IV Междунар. науч.-техн. конф. «Динамика систем, механизмов и машин». – Омск:

- ОмГТУ, 2002. – С. 140–142.
6. Охлопкова, А.А. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями / А.А. Охлопкова, А.В. Виноградов, Л.С. Пинчук. – Гомель, 1999. – 168 с.
 7. Новиков, В.В. Физические свойства полимерных композитов. Ренорм групповой подход / В.В. Новиков, О.В. Жаркова // ИФЖ. – Т. 71, № 4. – С. 718–729.
 8. Козлов, Г.В. Самоподобие и интервал масштабов измерения для каркаса частиц наполнителя в полимерных композитах / Г.В. Козлов, Ю.Г. Яновский, А.К. Михайлов // Механика композитных материалов. – 1998. – Т. 34, № 4. – С. 539–544.
 9. Новиков, В.У. Анализ структуры и свойства наполненных полимеров в рамках концепции фракталов. Полифрактальность структуры наполненных полимеров / В.У. Новиков, Г.В. Козлов // Пластические массы. – 2004. – № 4. – С. 27–38.
 10. Фракталы в физике. 6 Международный симпозиум по фракт. в физике / под ред. Л. Пьетронеро. – М.: МИР, 1988. – 670 с.
 11. Смирнов, Б.М. Фрактальные кластеры / Б.М. Смирнов // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 149, вып. 2. – С. 177–217.
 12. Белко, А.В. Методы построения объектов с фрактальной структурой / А.В. Белко, А.В. Никитин // Вестник Гродненского гос. ун-та. Серия 2. Математика. Физика. Техника. Информатика. Биология. Химия. Экология. – 2002. – № 2. – С. 56–61.
 13. Белко, А.В. Методы построения фрактальных кластеров с заданной фрактальной размерностью / А.В. Белко // Полиматериалы – 2003: материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Межфазная релаксация в полиматериалах», Москва, 25–29 нояб. 2003 г.; в 2 ч. / Москов. гос. ин-т радиотехники, электроники и автоматики. – М., 2003. – Ч. 1. – С. 35–40.
 14. Белко, А.В. Методы построения фрактальных кластеров / А.В. Белко, А.В. Никитин // Современные научные проблемы и вопросы преподавания теоретической и математической физики, физики конденсированных сред и астрономии: сб. материалов Междунар. науч.-метод. конф., Брест, 28–29 окт. 2003 г. / Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина; редкол.: В.С. Секержицкий [и др.]. – Брест, 2003. – С. 5–10.
 15. Белко, А.В. Методы генерации объектов с фрактальной структурой / А.В. Белко, А.В. Никитин // Актуальные проблемы физики твердого тела: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 4–6 нояб. 2003 г. / Ин-т физики твердого тела; редкол.: И.М. Олейникович [и др.]. – Минск, 2003. – С. 112–113.
 16. Фрактальная структура кластеров золота, образованных при напылении в вакууме на диэлектрические подложки / А.В. Белко, А.В. Никитин, И.Д. Стрекаль, А.Е. Герман // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2009. – № 5. – С. 11–15.
 17. Никитин, Д.А. Компьютерные модели агрегации в кластерных системах / Д.А. Никитин, А.В. Белко, А.В. Никитин // Низкоразмерные системы – 2: сб. науч. работ / Гродненский гос. ун-т; редкол.: С.А. Маскевич [и др.]. – Гродно, 2002. – С. 112–115.
 18. Белко, А.В. Моделирование структуры наполнителей в композитных системах / А.В. Белко // Транспорт. «Наука – будущее Литвы»: доклады 9-й конф. молодых ученых Литвы, Вильнюс, 25 мая 2006 г. / Вильнюс. техн. ун-т им. Гедиминаса; редкол.: О. Прентковский [и др.]. – Вильнюс, 2006. – С. 143–146.
 19. Белко, А.В. Модели фрактальной структуры наполнителей в композитных системах / А.В. Белко, И.В. Могильников // Транспорт. «Наука – будущее Литвы»: доклады 10-й конф. молодых ученых Литвы, Вильнюс, 23 мая 2007 г. / Вильнюс. техн. ун-т им. Гедиминаса; редкол.: О. Прентковский [и др.]. – Вильнюс, 2007. – С. 206–211.
 20. Белко, А.В. Кинетика образования фрактальных кластеров в дисперсных системах при необратимой коагуляции / А.В. Белко, А.В. Никитин // Вестник Гродненского гос. ун-та. Серия 2. Математика. Физика. Техника. Информатика. Биология. Химия. Экология. – 2006. – № 2. – С. 56–61.
 21. Козлов, Г.В. Агрегация частиц наполнителя в полимерных композитах: анализ в рамках моделей необратимой агрегации / Г.В. Козлов, Р.С. Мирзоев, Ю.С. Липатов // Механика композитных материалов. – 2002. – Т. 38, № 2. – С. 253–260.
 22. Шамурина, М.В. Влияние модификации частиц на структуру агрегатов и проводимость металлонаполненных пленочных композитов / М.В. Шамурина [и др.] // Коллоид. журн. – 1995. – Т. 57, № 4. – С. 580–584.
 23. Шамурина, М.В. Агрегация коллоидных частиц в отверждающихся системах / М.В. Шамурина [и др.] // Коллоид. журн. – 1994. – Т. 56, № 3. – С. 451–454.
 24. Белко, А.В. Кинетика образования фрактальных кластеров в конденсированных системах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / А.В. Белко. – Гродно, 2009. – 23 с.
 25. Белко, А.В. Влияние фрактальной структуры наполнителя на модифицируемый объем матрицы композиционного материала / А.В. Белко // Материалы междунар. науч.-техн. школы-конференции «МОЛОДЫЕ УЧЕНЫЕ–2008», Москва, 8–12 дек. 2008 г. / Москов. гос. ин-т радиотехники, электроники и автоматики; редкол.: А.С. Сигова [и др.]. – Москва, 2008. – Ч. 1. – С. 85–87.
 26. Бачурина, А.Ю. Численные методы расчета теплопроводности наполненных полимеров / А.Ю. Бачурина, А.В. Никитин, А.В. Белко // Вестнік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя 2.

Поступила в редакцію 12.08.11.

In the introduction an object of investigation is pointed – composites on the basis of polymeric compounds is specified. Methods of model operation structure of fillers in a matrix of composite are viewed. The purpose of research is development of models formation of structure clusters of a filler of composite. In the main part modification model aggregation by the restricted diffusion and is presented to model cluster aggregation by the restricted diffusion in view of probability sticking a diffusing particle and a configuration particles of a cluster in a band of sticking. It is shown, that dependence fractal dimensionality from probability sticking can compare to experimentally gained dependence fractal dimensionality from temperature. It (epoxide resin) allows to erect correlation between probability sticking and curing temperature, at least, for composite systems with aggregates of a filler (the nickeliferous powder handled and raw by stearic acid) in a polymeric matrix. Model aggregation by the restricted diffusion and model cluster aggregations by the restricted diffusion and their modifications allow to define quantitatively the relation of the modified volume a matrix of composite to the full volume a matrix (a degree of modifying). Quantitative assessments of influence fractal structures of clusters of a filler on a degree of modifying a matrix of composite are gained. Aggregation particles result ins to diminution of modifying activity of a filler. Diminution fractal dimensionality of structure of a filler, result ins to magnification of a degree of modifying a matrix of a composite, with other things being equal. The structure allocation of particles copper in a polymeric matrix polytetrafluoroethylene is considered at various concentrations of a filler. The results and the developed models can be used for examination of a thermal conduction of composite systems on the basis of polymeric compounds with a metal filler.

Keywords: composite material, filler, matrix, model diffusion-limited aggregation, model diffusion-limited cluster aggregation, fractal cluster, fractal dimensionality.

References

1. Ed. Kaats M., Menetskii A.M. Fillers for composite materials [Napolniteli dlia kompozitsionnykh materialov]. Moscow, 1988. 376 p.
2. Kulak M.I. Fractal Mechanics of Materials [Fraktal'naya mehanika materialov]. Minsk, 2002. 304 p.
3. Flesch J.C., Spicer P.T., Prasinis S.E. Laminar and Turbulent Shear-Induced Flocculation of Fractal Aggregates. *Materials. Interfaces and Electrochemical Phenomena*. 1999, vol. 45, no. 5, pp. 1114-1124.
4. Nikitin D.A. The method of calculating the thermal conductivity of the composite system [Metod rascheta koefitsienta teploprovodnosti kompozitsionnykh sistem]. *Fizika kondensirovannykh sred*. Grodno, 2002, pp. 239-240.
5. Nikitin D.A. The method of relaxation for the study of the thermal conductivity of composite systems [Metod relaksatsii dlia issledovaniya teploprovodnosti kompozitsionnykh sistem]. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin*. OmskGU, 2002, pp. 140-142.
6. Okhlopkova A.A., Vinogradov A.V., Pinchuk L.S. Plastics filled with ultrafine inorganic compounds [Plastiki, napolnennye ul'tradispersnym neorganicheskimi soedineniyami]. Gomel, 1999, 168 p.
7. Novikov V.V., Zharkova O.V. Physical properties of polymer composites. Renormalization group approach [Fizicheskie svoistva polimernykh kompozitov. Renorm gruppovoii podkhod]. IFJ, vol. 71, no. 4, pp. 718-729.
8. Kozlov G.V., Yanovskii Yu.G., Mikitaev A.K. Self-similarity and interval scales of measurement for the skeleton of filler particles in polymer composites [Samopodobie i interval mashtabov izmerenija dlia karkasa chastej napolnitelia v polimernykh kompozitakh]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov*, 1998, vol. 34, no. 4, pp. 539-544.
9. Novikov V.U., Kozlov G.V. Analysis of the structure and properties of filled polymers under the concept of fractals. Polyfractality structure of filled polymers [Analiz struktury i svoistva napolnennykh polimerov v ramkakh kontseptsii fraktalov. Polifraktalnost' struktury napolnennykh polimerov]. *Plasticheskie massy*, 2004, no. 4, pp. 27-38.
10. Ed. Petronero. Fractals in Physics. The 6th International Symposium on fractals. in physics [Fraktaly v fizike. 6 Mezhdunarodnyi simpozium po fraktalakh v fizike]. Moscow, 1988, 670 p.
11. Smirnov B.M. Fractal clusters [Fraktal'nye klastery]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1986, vol. 149, is. 2, pp. 177-217.
12. Belko A.V., Nikitin A.V. Methods of constructing objects with fractal structure [Metody postroenija ob'ektov s fraktal'noi strukturoi]. *Vestnik Grodzenskogo gosuniversiteta. Seria 2. Matematika. Fizika. Tekhnika. Informatika. Biologija. Khimiia. Ekologija*, 2002, no. 2, pp. 56-61.
13. Belko A.V. Methods of construction of fractal clusters with a given fractal dimension [Metody postroenija fraktalnykh klastEROV s zadannoi fraktal'noi razmernost'ju]. *Polimaterialy – 2003*. Moscow, 2003, p. 1, pp. 35-40.
14. Belko A.V., Nikitin A.V.; ed. Sekerzhitskij V.S. [et al.]. Methods of construction of fractal clusters [Metody postroenija fraktal'nykh klastEROV]. *Sovremennye nauchnye problemy i voprosy prepodavaniya teoreticheskoi i matematicheskoi fiziki, fiziki kondensirovannykh sred i astronomii*. Brest, 2003, pp. 5-10.

15. Belko A.V., Nikitin A.V.; ed. Olekhovich [et al.]. Methods of generating facilities with a fractal structure [*Metody generatsii ob'ektov s fraktal'noi strukturoi*]. *Aktual'nye problemy fiziki tverdogo tela*. Minsk, 2003, pp. 112-113.
16. Belko A.V., Nikitin A.V., Strekal N.D., German A.E. Fractal structure of gold clusters formed during the deposition in vacuum on dielectric substrates [*Fraktal'naya struktura klasteroў zolota, obrazovannykh pri nappylenii v vakuum na dielektricheskie podlozhki*]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neutronnye issledovaniia*. 2009, no. 5, pp. 11-15.
17. Nikitin D.A., Belko A.V., Nikitin A.V.; ed. Maskevich S.A. [et al.]. Computer models of aggregation in cluster systems [*Kompyuternye modeli agregatsii v klasternykh sistemakh*]. *Nizkorazmernye sistemy - 2*. Grodno, 2002, pp. 112-115.
18. Belko A.V.; ed. Prentkovskii O. [et al.]. Modeling of the structure of the fillers in composite systems [*Modelirovaniye strukturny napolnitelei v kompozitnykh sistemakh*]. *Transport. Nauka - budushchee Litvy*. Vil'nius, 2006, pp. 143-146.
19. Belko A.V., Mogilnikov I.V.; ed. Prentkovskii O. [et al.]. Models of fractal structure of the fillers in composite systems [*Modeli fraktal'noi strukturny napolnitelei v kompozitnykh sistemakh*]. *Transport. Nauka - budushchee Litvy*. Vil'nius, 2007, pp. 206-211.
20. Belko A.V., Nikitin A.V. The kinetics of formation of fractal clusters in disperse systems with irreversible coagulation [*Kinetika obrazovaniia fraktal'nykh klasteroў v dispersnykh sistemakh pri neobratimoi koagulatsii*]. *Vesnik Grodzenskogo Gosuniversiteta. Seriya 2. Matematika. Fizika. Tekhnika. Informatika. Biologija. Khimija. Ekologija*, 2006, no. 2, pp. 56-61.
21. Kozlov G.V., Mirzoev P.S., Lipatov Yu.S. Aggregation of filler particles in polymer composites: an analysis in models of irreversible aggregation [*Agregatsii chastits napolnitelia v polimernykh kompozitakh: analiz v ramkakh modelei neobratimoi agregatsii*]. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2002, vol. 38, no. 2, pp. 253-260.
22. Shamurina M.V. [et al.]. Effect of modifying the structure of aggregates of particles and the conductivity of metal-filled film composites [*Vliyanie modifitsirovaniia chastits na strukturu agregatov i provodimost metallonapolnennykh plenochnykh kompozitov*]. *Kolloid. J.*, 1995, vol. 57, no. 4, pp. 580-584.
23. Shamurina M.V. [et al.]. Aggregation of colloidal particles in the curing systems [*Agregatsii kolloidnykh chastits v otverzhdaushchikhsia sistemakh*]. *Kolloid. J.*, 1994, vol. 56, no. 3, pp. 451-454.
24. Belko A.V. The kinetics of formation of fractal clusters in condensed systems: summary of a dissertation for the degree of candidate of physical-mathematical sciences [*Kinetika obrazovaniia fraktal'nykh klasteroў v kondensirovannykh sistemakh: avtoref. dissertatsii*]. Grodno, 2009, 23 p.
25. Belko A.V.; ed. Sigova A.S. [et al.]. Influence of the fractal structure of the filler to the amount of modifiable matrix composite [*Vliyanie fraktal'noi strukturny napolnitelia na modifitsiruemyi ob'em matritsy kompozitsionnogo materiala*]. *Molodye uchenye-2008*. Moscow, 2008, Ч. 1, pp. 85-87.
26. Bachurina A.Yu., Nikitin A.V., Belko A.V. Numerical methods for calculating the thermal conductivity of filled polymers [*Chislennye metody rascheta teploprovodnosti napolnennykh polimerov*]. *Vesnik Hrodzenskaha Dzierzhaunaha Universiteta Imia Ianki Kupaly. Seryia 2. Matematyka. Fizika. Informatyka. Vylichal'naya Tekhnika i Kirovanne*, 2011, no. 1, pp. 106-111.

