

ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН, ПРИБОРОВ И АППАРАТУРЫ

УДК 678.017: 620.17

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИКИ ПОТОКА ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Черникова Татьяна Макаровна¹,

доктор техн. наук, доцент кафедры общей электротехники. e-mail: chtm.oe@yandex.ru

Иванов Вадим Васильевич¹,

доктор техн. наук, профессор кафедры теоретической и геотехнической механики.

e-mail: vvi@kuzstu.ru

Михайлова Екатерина Александровна²,

канд. техн. наук, ведущий специалист. e-mail: katemea82@gmail.com

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

² Объединенное диспетчерское управление энергосистемами Сибири, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Кузбасская, 29.

Аннотация

Для успешного продвижения в решении проблемы прочности необходимо проведение экспериментальных исследований физических закономерностей разрушения конкретных композиционных материалов и построение на этой основе ясных физических представлений о процессе разрушения композита и оптимальных методах исследования разрушения.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение характера случайного процесса трещинообразования на основе исследования статистики нормированного размаха Херста для импульсов электромагнитной эмиссии нагруженных образцов композиционных материалов, поскольку импульсы электромагнитной эмиссии, порождаемые процессом образования микротрещин, являются случайным процессом, обладающим теми же статистическими свойствами, что и сам процесс трещинообразования. Исследования электромагнитной эмиссии при нагружении фенопластов Т214, Т266 и текстолитов ПТМ, ПТН проводились на установке, позволяющей регистрировать параметры и количество импульсов электромагнитной эмиссии. В процессе нагружения исследовалась степенная зависимость Херста для статистики нормированного размаха накопленных средних. Для марковских случайных процессов (процессов с независимыми приращениями) показатель Херста близок к 0,5. В случае, если нагружаемый образец ведет себя как система с памятью, этот показатель больше 0,5.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

Для образцов различного состава, технологии изготовления, подвергнутых термообработке и нет, наблюдается двухстадийный характер процесса трещинообразования.

Поскольку значения показателя Херста $H > 0,5$, то процесс трещинообразования на последней стадии является персистентным случайным процессом, более сложным, чем пуассоновский. Он характеризуется показателем Херста H , находящимся в интервале от 0,55 до 1,5.

Показатель Херста H для статистики нормированных отклонений накопленных средних при изучении временных потоков структурных повреждений в композиционных материалах может служить показателем перехода материала на критическую стадию разрушения.

Ключевые слова: композиционные материалы, разрушение, электромагнитная эмиссия, импульсы, показатель Херста.

Многие современные исследования по проблемам прочности полимерных композитов основаны на представлении об универсальном механизме образования элементарных повреждений. Таким универсальным механизмом выступает термофлуктуационный механизм разрыва молекулярных и межмолекулярных связей, приводящий к

образованию элементарных точечных дефектов структуры.

Образование разрывов молекулярных и межмолекулярных связей, согласно этому механизму, происходит по законам статистической физики и контролируется внешними термодинамическими параметрами состояния системы (температурой,

механическим напряжением). Термодинамическое состояние системы определяет макроскопические кинетические константы, а через них и все другие параметры, контролирующие процессы термохимической деструкции полимерной матрицы и адгезионных слоев «матрица - армирующий наполнитель». Эти процессы, в конечном счете, и отвечают за потерю работоспособности и разрушение материала в процессе эксплуатации.

В ряде работ [1-3] установлено, что процесс накопления элементарных повреждений может перейти на стадию макроскопического разрушения только тогда, когда концентрация элементарных повреждений достигнет критической величины, которая является в определенной степени универсальной. Эта закономерность носит общий характер, не зависит от специфики конкретного разрушаемого материала и проверена на самых разнообразных материалах - от горных пород до полимерных композитов.

Процесс макроскопического разрушения может быть принципиально описан без обращения к подробностям динамики отдельных элементарных актов, а лишь опираясь на концентрационный критерий разрыва сплошности структуры разрушаемого материала. При этом макроскопическое разрушение рассматривается как своеобразный фазовый переход, управляемый единственным параметром - концентрацией разорванных связей.

Последовательной физической моделью, описывающей процесс такого фазового перехода, является так называемая перколяционная модель разрушения. В этой модели по мере роста концентрации разорванных связей, отдельные разорванные связи объединяются в кластеры - аналоги макроскопических дефектов структуры. При достижении концентрацией разорванных связей критического значения в системе происходит фазовый переход - прорастание в материале бесконечного кластера, что соответствует разделению тела магистральной трещиной [4].

Важнейшей характеристикой перколяционных моделей является существование для бесконечной системы критической концентрации разорванных связей, при достижении которой и происходит макроразрушение.

Другой важной чертой перколяционных моделей является тот факт, что перколяционные кластеры имеют сложную хаотическую структуру и описываются математически как фракталы - геометрические объекты с дробной пространственной размерностью [5]. Этот факт имеет принципиальное значение по той причине, что в проведенных в последнее время экспериментальных исследованиях структуры поверхностей разрушения реальных материалов не только была подтверждена их фрактальность, но и была измерена дробная фрактальная размерность поверхностей разрушения [6-8].

Центральной рабочей гипотезой теории обра-

зования фрактальных кластеров является предположение о том, что пространственный фрактал является «пространственным срезом» универсального пространственно-временного процесса "самоорганизованной критичности" [9]. "Временным срезом" этого процесса являются случайные процессы с долговременной памятью. Такие случайные процессы не являются марковскими и характеризуются медленно убывающими степенными функциями корреляции:

$$G(t) = G(0)(t^{2H-1} - 1),$$

характеризуемыми значениями так называемого показателя Херста $H \neq 0,5$ [5].

Поскольку для физики разрушения эти понятия чрезвычайно важны, в [10-12] выполнены измерения показателя Херста для процесса накопления элементарных повреждений в некоторых горных породах и полимерных композитах, и была установлена связь между показателем Херста для процесса накопления элементарных повреждений и концентрационным критерием разрушения.

Для успешного продвижения в решении проблемы прочности необходимо еще значительное число экспериментальных исследований физических закономерностей разрушения конкретных композиционных материалов и построение на этой основе ясных физических представлений о процессе разрушения композита и оптимальных методах исследования разрушения.

Настоящая работа посвящена экспериментальному определению характера случайного процесса трещинообразования на основе исследования статистики нормированного размаха Херста для импульсов электромагнитной эмиссии нагруженных образцов композиционных материалов, поскольку импульсы электромагнитной эмиссии, порождаемые процессом образования микротрещин, являются случайным процессом, обладающим теми же статистическими свойствами, что и сам процесс трещинообразования.

В качестве исследуемых образцов использовались фенопласты, композиционные материалы на основе фенолоформальдегидных смол и различного типа наполнителей, которые нашли широкое распространение в различных отраслях промышленности. Исследовались порошковые фенопласты Т214, Т266 и текстолиты ПТМ, ПТН. Образцы изготавливались размером $10 \times 10 \times 15$ мм³.

Исследования электромагнитной эмиссии проводились на установке [13], позволяющей регистрировать импульсы электромагнитной эмиссии длительностью от 0,1 мкс до 100 мс, записывать их форму, определять характеристики каждого отдельного импульса, время нарастания, время релаксации зарядов, считать полное число импульсов за определенный промежуток времени, записывать диаграмму нагружения, отслеживать кинетику процесса накопления повреждаемостей

структуры на основе счета импульсов электромагнитной эмиссии.

Обработка экспериментальных данных проводилась следующим образом.

Весь временной интервал от начала нагружения до разрушения образца (t_p) разбивался на n равных интервалов времени $\Delta t = const$ (5, 10, 20, ... с). На протяжении всего процесса нагружения вплоть до разрушения образца на каждом k -том интервале фиксировалось количество зарегистрированных импульсов N_k . Для каждого интервала вычислялись:

среднее число импульсов

$$\bar{N}_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n N_k,$$

накопившиеся отклонения

$$N_{k,n} = \sum_{i=1}^k (N_i - \bar{N}_n), \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

размах

$$R_n = \max_{k \leq n} N_{k,n} - \min_{k \leq n} N_{k,n},$$

стандартное отклонение

$$S_n = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n N_k^2 - \bar{N}_n^2 \right\}^{1/2}.$$

Зависимость накопленных отклонений статистики импульсов R_n/S_n от времени строилась в логарифмических координатах $\lg(R_n/S_n) = f(\lg n)$.

Исследование случайных процессов типа обобщенного броуновского движения показало, что эти процессы хорошо описываются степенной зависимостью Херста для статистики нормированного размаха накопленных средних [11]:

$$\frac{R_t}{S_t} \sim t^H, \quad (1)$$

где H – показатель Херста; t – время. Для марковских случайных процессов (процессов с независимыми приращениями) показатель Херста близок к 0,5. В случае, если нагружаемый образец ведет себя как система с памятью, он больше 0,5.

Типичные зависимости $\lg(R_n/S_n) = f(\lg n)$ для различных образцов композиционных материалов приведены на рис.1–рис.3. Видно, что на

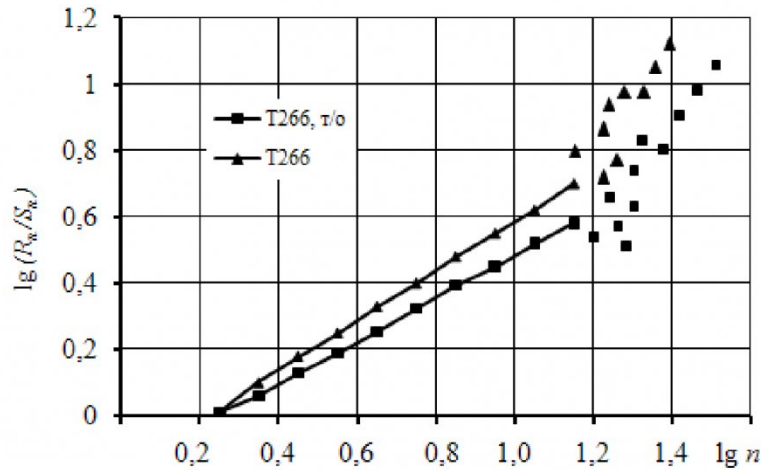


Рис. 1. Зависимость нормированного размаха от времени для образцов фенопласта T266, подвергнутого термообработке (τ/o) и без неё

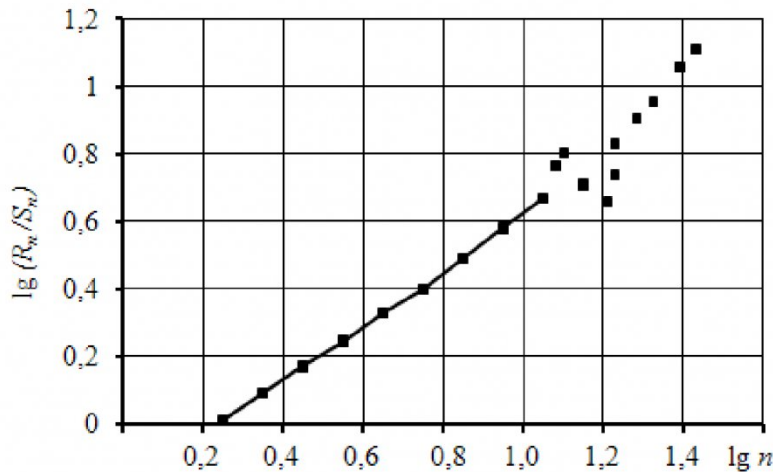


Рис. 2. Зависимость нормированного размаха от времени для образцов фенопласта T214

зависимостях $\lg(R_n/S_n)=f(\lg n)$ имеются два участка. Этот факт указывает на то, что показатель Херста H имеет различные значения на разных стадиях нагружения. Для порошковых фенопластов на начальном участке, соответствующем возрастанию нагрузки от нуля до $50 \div 60\%$ от разрушающей наблюдается линейная зависимость $\lg(R_n/S_n)=f(\lg n)$ с показателем $H \cong 0,55 \div 0,60$. При более высоком значении нагрузки показатель Херста может увеличиваться до $H \cong 1,2 \div 1,3$. Переход от первого участка ко второму характеризуется хаотическим поведением связи $\lg(R_n/S_n)=f(\lg n)$.

Рис. 1, 2 иллюстрируют зависимости $\lg(R_n/S_n)=f(\lg n)$ для фенопластов Т266 и Т214. Из рисунков видно, что уже в середине процесса нагружения для образцов фенопластов характерен переход зависимости $\lg(R_n/S_n)=f(\lg n)$ ко второму участку, который отвечает моменту формирования очага разрушения, т.е. переходу на последний этап (стадию) нагружения, когда накопление микротрещин происходит вблизи их крупной ассоциации и дальнейшая генерация микротрещин обусловлена перенапряжением связей вблизи ассоциации микротрещин. В этом случае процесс рождения микротрещин становится нестационарным не марковским случайным процессом, обладающим памятью о предыдущем этапе нагружения (о моменте формирования крупной ассоциации микротрещин, моменте локализации разрушения в очаге). Как видно из рис. 1, 2, моментам перехода очага в качественно новое состояние соответствует появление изгибов на кривой $\lg(R_n/S_n)=f(\lg n)$, поскольку в этот момент времени нормированный размах R_n/S_n ведет себя скачкообразным (хаотическим) образом.

Среднее значение показателя Херста для термообработанных образцов (рис.1) оказывается меньше ($H \cong 0,65$), чем для образцов без термо-

обработки ($H \cong 0,75$), что свидетельствует о формировании и локализации очага разрушения в обычных образцах Т266 на более ранних этапах нагружения, чем в термообработанных. Как правило, в этом случае также моменты перехода зависимости нормированного размаха через точку перегиба характеризуются изменением показателя Херста (рис.1).

Для текстолитов ПТН, ПТМ, имеющих слоистую структуру, также наблюдается линейность зависимости $\lg(R_n/S_n)=f(\lg n)$ до некоторой величины приложенного напряжения σ .

При нагружении образцов ПТН поперек структурных слоев наблюдается линейная зависимость $\lg(R_n/S_n)=f(\lg n)$, для которой индекс Херста $H = 0,67 - 0,72$ до нагрузок $\sim 0,5 \sigma_p$ (σ_p – разрушающее напряжение). При увеличении нагрузки на графиках наблюдаются отклонения от линейности (нестабильности) (рис. 3). Для некоторых образцов индекс H увеличивается до 1,5.

При нагружении вдоль структурных слоев как для ПТН, так и для ПТМ на линейном участке индекс Херста несколько больше, чем при нагружении поперек слоев (рис. 3). При этом линейность наблюдается также до нагрузок $\sim (0,45 - 0,55) \sigma_p$.

Анализ приведенных зависимостей показывает, статистика нормированного размаха накопленных средних до некоторого момента времени хорошо подчиняется уравнению Херста (1). В дальнейшем либо показатель изменяется, либо начинается его хаотическое скачкообразное изменение, которое может быть обусловлено переходом формирующегося в образцах композиционных материалов очага разрушения в новое качественное состояние (образование крупных трещин и их ансамблей, подготавливающих разрыв образца).

Выводы

1. Для образцов различного состава, технологии изготовления, подвергнутых термообра-

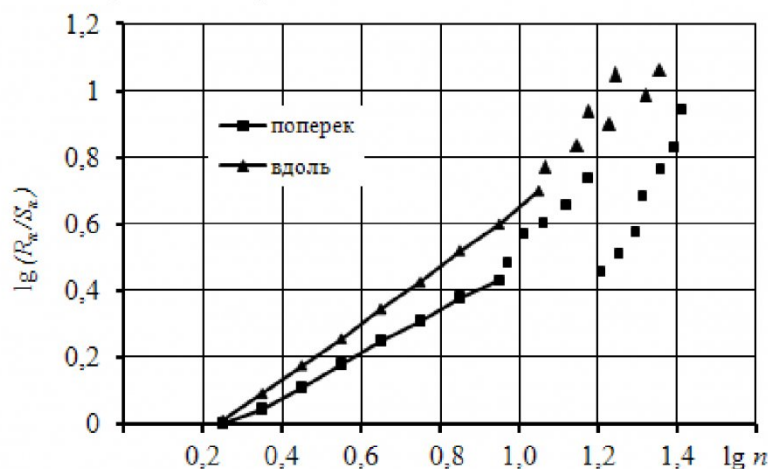


Рис. 3. Зависимость нормированного размаха от времени для образцов текстолита ПТН при нагружении вдоль и поперек слоев

ботке и нет, наблюдается двухстадийный характер процесса трещинообразования.

2. Поскольку значения показателя Херста $H > 0,5$, процесс трещинообразования на последней стадии является персистентным случайным процессом, более сложным, чем пуассоновский. Он характеризуется показателем Херста H , находящимся в интервале от 0,55 до 1,5.

3. Показатель Херста H зависимости (1) для статистики нормированных отклонений накопленных средних при изучении временных потоков структурных повреждений в композиционных материалах может служить показателем перехода материала на критическую стадию разрушения. Причем первая стадия накопления микротрещин характеризуется линейным участком логарифмической кривой зависимости накопленных нормированных отклонений от времени

с показателем Херста $H > 0,5$.

Таким образом, изучение статистических свойств кинетического процесса накопления микроразрушений структуры композиционных материалов на основе фенолоформальдегидных смол позволило установить, что этот процесс на последней стадии нельзя считать марковским случайным процессом. Это находится в полном согласии с полученными оценками показателя Херста $H > 0,5$ для подавляющего числа образцов полимерных композитов, и характерно для случайных процессов с памятью (наследственностью).

Проведенные исследования способствуют развитию и совершенствованию методов контроля разрушения, поскольку по изменению показателя Херста при нагружении можно оценивать текущее механическое состояние и диагностировать стадию разрушения материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журков, С.Н. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, В.А. Петров // В кн. "Физические процессы в очагах землетрясений". – М.: Наука, 1980. – С.43–46.
2. Журков, С.Н. Физические основы прогнозирования механического разрушения / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, В.А. Петров // ДАН СССР. – 1981. – Т.259. – №6. – С.1350–1353.
3. Куксенко, В.С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел // В сб. "Физика прочности и пластичности". – Л.: Наука. – 1986. – С.36–41.
4. Приезжев, В.В. Анизотропная модель перколяции плакетов – модель разрушения твердых тел / В.В. Приезжев, С.А. Терлецкий // Физика тв. тела. – 1989. – Т.31. – № 4. – С.125–128.
5. Федер, Е. Фракталы. – М.: Мир. – 1991. – 260 с.
6. Фракталы в физике. – М.: Мир. – 1989. – 586 с.
7. Баланкин, А.С. Фрактальная размерность трещин, образуемых при разрушении модельных решеток и твердых тел / А.С. Баланкин, А.Л. Бугримов // Письма в журн. техн. физики. – 1991. – Т.17. – №11. – С.63–67.
8. Бородич, Ф.М. Энергия разрушения фрактальной трещины, распространяющейся в бетоне или горной породе // ДАН СССР. – 1992. – Т.325. – №6. – С.1138–1141.
9. Bak, P. Self-Organized Criticality / Per Bak, Chao Tang, Kurt Wiesenfeld // Phys. rev. A. – 1988. – N1. – P. 364–372.
10. Алексеев, Д.В. Персистентность накопления трещин при нагружении горных пород и концентрационный критерий разрушения / Д.В. Алексеев, П.В. Егоров // ДАН СССР. – 1993. – Т.333. – №6. – С.779–780.
11. Алексеев, Д.В. Херстовская статистика временной зависимости электромагнитной эмиссии при разрушении горных пород / Д.В. Алексеев, П.В. Егоров, В.В. Иванов, Мальшин А.А., Пимонов А.Г. // Физ.-техн. пробл. разр. полезн. иск. – 1993. – № 5. – С.45–49.
12. Иванов, В.В. Херстовская статистика временных потоков структурных повреждений композиционных материалов как показатель эволюции очага разрушения / В.В. Иванов, В.И. Климов, Т.М. Черникова // Прикл. мех-ка и техн. физика. – 1997. – Т.38. – № 1. – С.136–139.
13. Черникова, Т.М. Метод контроля разрушения композиционных материалов на основе анализа электромагнитного излучения // Т.М. Черникова, В.В. Иванов // Естественные и технические науки. – 2012. – № 6. – С.365–369.

. STUDY OF STATISTICS OF THE STREAM OF PULSES ELECTROMAGNETIC EMISSION AT DESTRUCTION COMPOSITE MATERIALS

Chernikova Tatiana M.,¹

Dr. Sc. in Engineering, E-mail: chtm.oe@yandex.ru

Ivanov Vadim V.,¹

Dr. Sc. in Engineering. E-mail: vvi@kuzstu.ru

Mikhaylova Ekaterina A.,²

C. Sc. (Engineering), System Operator. E-mail: katemea82@gmail.com

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya st., Kemerovo, 650000, Russia.

²United Power System», Joint-stock Company, 29, Kuzbasskaya st., Kemerovo, 650000, Russia.

Abstract

The urgency of the discussed issue. Successful advance in a solution of the problem of durability requires carrying out pilot studies of physical regularities of destruction of concrete composite materials and construction on this basis of clear physical ideas of process of destruction of a composite and optimum methods of research of destruction.

The main aim of this paper experimental determination of nature of casual process of formation of cracks on the basis of research of statistics of rated scope of Hurst for electromagnetic impulses of the loaded samples of composite materials. As the impulses of electromagnetic issue generated by process of formation of microcracks are the casual process possessing the same statistical properties, as process of formation of cracks. The methods used in the study. Studies of electromagnetic emission during loading phenoplasts T214, T266 and textolites PTM, PTN were carried out on the installation allowing to register parameters and quantity of impulses of electromagnetic emissions. In the process of loading exponential law of Hurst for statistics of rated scope of the accumulative averages was investigated. For Markov casual processes Hurst exponent is close to independent increments to 0,5. In case the loaded sample behaves as system with memory, this indicator more than 0,5.

The results. For samples of different composition, manufacturing technology, heat-treated and no, two-phasic nature of process of formation of cracks is observed. As values of Hurst exponent $H > 0.5$, process of formation of cracks at the last stage is the persistent casual process, more difficult, than Poisson. It is characterized by the Hurst exponent H who is in the range from 0,55 to 1,5. Hurst exponent H for statistics of rated deviations of the accumulation averages when studying temporary streams of structural damages to composite materials can serve as an indicator of the material transition to a critical stage of destruction.

Key words: composite materials, destruction, electromagnetic emission, pulses, Hurst exponent .

REFERENCES

1. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Kонтсentratsionnyy kriteriy ob"mnogo razrusheniya tverdykh tel [Concentration criterion of volume destruction of solid bodies]. Fizicheskie protsessy v ochagakh zemletryaseny [Physical processes in the centers of earthquakes]. Moscow, Nauka, 1980. pp. 43–46.
2. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Fizicheskie osnovy prognozirovaniya mekhanicheskogo razrusheniya [Physical bases of forecasting of mechanical destruction]. Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of academy of Sciences of the USSR]. 1981. Vol. 259, No. 6. pp. 1350–1353.
3. Kuksenko V.S. Model' perekhoda ot mikro- k makrorazrusheniyu tverdykh tel [Transition model from micro to macrodestruction of solid bodies]. Fizika prochnosti i plastichnosti [Physics of durability and plasticity]. Leningrad, Nauka, 1986. pp. 36 – 41.
4. Priezzhev V.V., Terletskiy S.A. Anizotropnaya model' perkolyatsii plaketov – model' razrusheniya tverdykh tel [Anisotropic model of a perkolyation of plaket – model of destruction of solid bodies]. Fizika tverdogo tela [Solid state physics]. 1989. Vol. 31, No 4. pp.125–128.
5. Feder E. Fraktaly [Fractals]. Moscow, Mir, 1991. 260 P.
6. Fraktaly v fizike [Fractals in physics]. Moscow, Mir, 1989. 586 P.
7. Balankin A.S., Bugrimov A.L. Fraktal'naya razmernost' treshchin, obrazuemyykh pri razrushe-nii model'nykh reshetok i tverdykh tel [Fractal dimension of the cracks formed at destruction of model lattices and solid bodies]. Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Letters in the journal of technical physics]. 1991. Vol. 17. No. 11. pp. 63–67.
8. Borodich F.M. Energiya razrusheniya fraktal'noy treshchiny, rasprostranyayu-shcheysya v betone ili gornoy porode [Energy of destruction of the fractal crack extending in concrete or rock]. Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of academy of Sciences of the USSR]. 1992. Vol. 325. No. 6. pp. 1138–1141.
9. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-Organized Criticality / Phys. rev. A, 1988. No. 1. pp. 364–372.
10. Alekseev D.V., Egorov P.V. Persistentnost' nakopleniya treshchin pri nagruzhonii gor-nykh porod i kontsentratsionnyy kriteriy razrusheniya [Persistence of accumulation of cracks when loading rocks and concentration criterion of destruction]. Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of academy of Sciences of the USSR]. 1993. Vol. 333. No. 6. pp. 779–780.
11. Alekseev D.V., Egorov P.V., Ivanov V.V., Mal'shin A.A., Pimonov A.G. Kherstovskaya statistika vremennoy zavisimosti elektro-magnitnoy emissii pri razrushenii gornyykh porod [Herstovsky statistics of temporary dependence of electromagnetic issue at destruction of rocks]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrusheniya poleznykh iskopaemykh [Physics and technology problems of destruction of minerals]. 1993. No. 5. pp. 45–49.
12. Ivanov, V.V., Klimov V.I., Chernikova T.M. Kherstovskaya statistika vremennykh potokov strukturnyykh povrezhdeniy kompozitsionnykh materialov kak pokazatel' evolyutsii ochaga razrusheniya [Herstovsky statistics of temporary streams of structural damages of composite materials as indicator of evolution of the center of destruction]. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Applied mechanics and technical physics]. 1997. Vol. 38. No. 1. pp. 136 – 139.
13. Chernikova T.M., Ivanov V.V. Metod kontrolya razrusheniya kompozitsionnykh materialov na osnove analiza elektromagnitnogo izlucheniya [Method of control of destruction of composite materials on the basis of the analysis of electromagnetic radiation]. Estestvennyye i tekhnicheskie nauki [Natural and technical science]. 2012. No. 6. pp. 365-369

Received 15 April 2015