

УДК [622.02: 539.2/8]: 620.174.24

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИИ ЧАСТИЦ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ

<sup>1</sup>Горобец Л.Ж., <sup>2</sup>Верхоробина И.В.

<sup>1</sup>Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»,

<sup>2</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ГРАНУЛОМЕТРІЇ ЧАСТИНОК ГЕОМАТЕРІАЛІВ ПРИ РУЙНУВАННІ

<sup>1</sup>Горобець Л.Ж., <sup>2</sup>Верхоробіна І.В.

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,

<sup>2</sup> Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

## REGULARITIES OF FORMATION OF GEOLOGICAL MATERIAL PARTICLES GRANULOMETRY AT THEIR DESTRUCTION

<sup>1</sup>Gorobets L.J., <sup>2</sup>Verhorobina I.V.

<sup>1</sup>National Technical University «Dnepr Polytechnic», <sup>2</sup>Institute of Geotechnical Mechanics named  
by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine

**Аннотация.** Цель работы состоит в обобщении закономерностей формирования распределений частиц по размерам при разрушении (измельчении) материалов с позиций новых открытий в физике разрушения и современных знаний о развитии фрагментирования в нагружаемом геоматериале, в частности, с учетом дискретно-волновой природы вещества, авторезонансного механизма разрушения (диспергирования) и фрактального закона о полимодальном распределении частиц по размерам. Рассмотрены закономерности формирования распределений по размерам частиц при разрушении с учетом связей, задающих структуру и уровень накопления энергии к моменту распада твердого тела на фрагменты и отдельности. Важным фактором взаимодействия и укрупнения микротрещин является гетерогенность структуры нагружаемого тела. Обоснованы физические принципы, критерии и параметры эволюции фрагментирования при нагружении геологического материала. В развитии эффектов диспергирования ведущая роль отводится стадии авторезонанса. Принцип автомодельности разрушения на любом масштабном уровне задает связь длины акустических волн при разрывах с длиной трещин. Сформулированы научные предпосылки изучения гранулометрии разрушенных частиц. Новый подход к решению поставленной задачи включает использование связи дискретно-волнового критерия микроразрушения с процессом диспергирования. Дано физическое объяснение закономерности появления максимумов на кривых распределения частиц по размерам. Процесс формирования гранулометрического состава частиц при разрушении (дроблении, измельчении) реализуется с участием закономерности выполнения для ряда характерных размеров частиц геометрической прогрессии, основанием которой служит величина дискретно-волнового критерия микроразрушения  $B_\lambda = 2,1-3,1$ . Приведенные примеры подтверждают принцип подобия распределений трещин и отдельностей. Поскольку характерные размеры образующихся частиц кратны величине  $B_\lambda$ , представляется целесообразным при оценке гранулометрии измельченных продуктов соблюдение величины модуля классификации на уровне значения дискретно-волнового критерия микроразрушения.

**Ключевые слова:** геологические материалы, трещина, разрушение, дискретно-волновой критерий, измельчение, гранулометрия.

**Введение.** Круг вопросов, касающихся формирования гранулометрии измельченных продуктов, интересует исследователей с позиции качественно-количественного анализа процесса измельчения и выбора энергетически рациональных параметров обработки материала. Способ и скорость нагружения, плотность энергии при разрушении должны изменяться в зависимости от задаваемой крупности кусков или распределений по размерам частиц измельченного продукта.

Полагаем, что понимание механизма образования частиц при разрушении может способствовать решению проблемы снижения энергозатрат при получении порошков требуемого гранулометрического состава.

Знание закономерностей формирования гранулометрии частиц необходимо для прогнозирования эффектов измельчения (диспергирования) и классификации геоматериалов по измельчаемости на любом масштабном уровне разрушения.

При анализе распределений частиц по размерам различными методиками (ситовый, седиментационный, микроскопический) возникают трудности совмещения результатов, особенно в области менее 10 мкм. На практике нередко наблюдается асимметричная форма кривых распределения со спадом в сторону тонкодисперсных частиц. Сужение контролируемого диапазона размеров, нарушение условия постоянства модуля классификации, практическая неисследованность диапазона крайних высокодисперсных фракций обуславливают один максимум на кривых распределения, и это удобно для математической аппроксимации гранулометрических характеристик, например, логарифмически нормальным законом по А.Н. Колмогорову. Однако известные случаи наблюдения функций распределения с двумя и более максимумами не получили физического объяснения, например, полимодальность в распределении по размерам отдельностей при разрушении взрывом, закономерность повторяемости актов землетрясений, а также спектров акустических колебаний в земной коре.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Изучение устройства и разрушения объектов материального мира, включая закономерности формирования гранулометрии частиц при разрушении, проводится на основе достижений физики прочности и разрушения, в частности, кинетической концепции, созданной С.Н.Журковым и его школой, фундаментального принципа концентрационного укрупнения трещин, введенного В.С.Куксенко, автоколебательной теории В.Н.Бовенко для предразрушающего состояния с ее применением в развитии теории диспергирования [1-7].

Следует отметить, что проблемы разрушения в настоящее время рассматривают и решают в свете самоорганизующихся неравновесных структур и синергетическом взаимодействии дефектов [4, 8, 9]. Физическое определение *самоорганизации* состоит в самопроизвольном, не связанном с действием внешних организующих полей, регулярном поведении сложной системы. В сильно неравновесных условиях предразрушения (за пределом прочности), когда на диаграмме напряжение-деформация наблюдается ниспадающая ветвь, важно учитывать *дискретно-волновую* природу перестройки кристаллической решетки и *релаксационные (разрывные) колебания* атомов вблизи дефектов структуры. Колебания называют разрывными, если в определенные моменты времени изменения параметров состояния вещества происходят скачкообразно, тогда как сами системы, в которых возникают такие колебания, называют *системами разрывного типа*.

*Зарождение трещин* и разрушение происходят под действием не только

тепловых, но и автоакустических флуктуаций. В локальные зоны конденсированной среды при отклонениях от термодинамического равновесия возникают *автовозбуждения* активности вещества с эффектами коллективной перестройки (самоорганизации) атомов по *авторезонансному* механизму. Необходимо иметь в виду, что любой процесс разрушения сопровождается эффектами *диспергирования* из-за *дискретности строения* нагружаемой среды и *дискретно-волновых проявлений* механизма саморазрушения через автовозбуждения активности вещества [10, 11].

Природа автовозбуждений согласно В.Н.Бовенко является квантово-механической, ибо они возникают при критической скорости  $v_B$  частиц (скорости атомов при потере устойчивости кристаллов). Для большинства твердых тел предельная скорость перестройки атомов в процессе разрушения  $v_B$  рассчитывается по формуле:  $v_B = h/ma$ ;  $v_B/c = 10^{-3}-10^{-2}$  ( $h$  - постоянная Планка;  $a$  - межатомное расстояние,  $m$  - масса атома;  $c$  - скорость звука). С образованием автовозбуждений развиваются процессы саморазрушения (авторезонанса) с критической скоростью  $v_m = \sqrt{v_B c} \cong (10^{-2} \dots 10^{-1})$  с. Диапазон изменения  $v_m$  для геосред совпадает со скоростью роста трещин, а  $v_B$  - со скоростью расширения берегов трещин.

Научные положения об активной роли автоакустических возбуждений в развитии разрушения учтены в новом методологическом подходе к изучению закономерностей *микродиспергирования* - стадии формирования разрушенных *частиц на микроуровне* [6]. Основу формирования распределений по размерам измельченных частиц при разрушении геологического материала составляют элементарные акты *микродиспергирования* - необратимые разрывы межатомных связей, происходящие на различных иерархических структурных уровнях деформации нагружаемого тела. Процесс *диспергирования* - разделения нагружаемой среды на изолированные фрагменты и тонкодисперсные отдельные, реализуется *под действием акустических волн* в активных локальных зонах при разрывных автоколебаниях конденсированного вещества, т.е. *на стадии авторезонанса*. При этом коэффициент полезного действия диспергирования не превышает теоретической величины коэффициента трансформации энергии кристаллической решетки в акустическую энергию.

Явление излучения упругих волн при образовании трещин составляет суть метода *акустической эмиссии* (АЭ), применяемого для оценки размеров трещин в диапазоне от микроскопических до километровых. Экспериментально установлено подобие спектров АЭ при разрушении лабораторных образцов и геомассива (включая землетрясения), что подтверждает *автомодельность* этого процесса. Большим числом работ [6,12-14] подтверждено, что эффекты трещинообразования контролируются методом АЭ на любом масштабном уровне, в разных условиях нагружения, включая переход к саморазрушению с потерей несущей способности нагружаемого твердого тела.

**Цель работы** состоит в обобщении закономерностей формирования

распределений частиц по размерам при разрушении (измельчении) материалов с позиций новых открытий в физике разрушения и современных знаний о развитии фрагментирования в нагружаемом геоматериале, в частности, с учетом дискретно-волновой природы вещества, авторезонансного механизма разрушения (диспергирования) и фрактального закона о полимодальном распределении частиц по размерам.

**Основной материал исследования.** В физике прочности экспериментально доказано, что во-первых, разрушение твердого тела - это *кинетический процесс* зарождения микротрещин под действием внешней нагрузки; во-вторых, для первой стадии разрушения характерно образование трещин сразу определенных размеров, близких по величине к размерам структурных элементов. Для различных типов материалов (кристаллов, металлов, горных пород, полимеров) установлен *объемный характер* разрушения из-за гетерогенности структуры, приводящей к неравномерности распределения напряжений по объему нагруженного тела. Для геосред процесс разрушения носит двухстадийный характер: первая стадия - *безочаговое делокализованное* разрушение, генерация микротрещин и увеличение их концентрации; вторая стадия - *формирование очага разрушения*, когда достигается *пороговая* концентрация микротрещин, при которой возможно их взаимодействие и укрупнение. На втором этапе разрушения в различных местах образца и в различное время достигаются *критические концентрации* трещин, приводящие к образованию трещин более высокого масштаба. Существует количественная связь между размерами образующихся микротрещин и пороговой концентрацией, по достижении которой начинается смена стадий трещинообразования (переход к макроразрушению).

Путь перехода трещин на новый уровень контролируется концентрационным критерием  $K$ , характеризующим отношение среднего расстояния между трещинами  $L_k$  ( $k$  – порядок ранга разрушения) к их преимущественному поперечному размеру  $l_k$ :  $K = L_k / l_k$ . Средняя величина  $K$  оценивается в процессе трещинообразования по объемной концентрации  $N$  и размеру  $l$  трещин  $K = N^{-1/3} / l$ . Исследования показали, что с ростом масштаба  $D$  разрушения разрывная концентрация трещин уменьшается, а относительное расстояние  $K$  между ними к моменту развала сплошности нагружаемого объекта растет. В диапазоне  $D=4 \cdot (10^{-4} - 10^1)$  м средняя величина  $K$  возрастает от 3 до 10 согласно зависимости:  $lgK=1,1+0,2lgD$  [6]. Физическое обоснование размерного эффекта концентрационного параметра укрупнения трещин введено В.А. Петровым [12].

Согласно теоретическим оценкам Бовенко В.Н. [15, 16] «распределение по размерам элементов атомно-молекулярной структуры полимодально, поскольку в объеме материала сосуществуют несколько уровней, образующих иерархию атомно-молекулярной самоорганизации конденсированного вещества. Полимодальность в распределении частиц удается проследить как при разрушении, так и при образовании конденсированной фазы в широком

диапазоне масштабов - 15 порядков ( $10^{-10}$ - $10^5$  м)».

Акт диспергирования включается по достижении критической плотности  $W_{\Delta V}$  энергии, достаточной для запуска авторезонансного механизма разрывов межатомных связей. При переходе через уровень *энергетического порога*  $W_{\Delta V}$  срабатывает спусковой механизм высвобождения накопленной энергии с эффектом раскрытия фрагментов и отдельностей [6]. Релаксационные автоколебания атомов приведут нагруженную систему к разрушению при условии приближения текущего значения концентрационного параметра  $K$  (на некотором структурном уровне  $k$  деформации) к диапазону ( $B_\lambda \leq 2,1-3,1$ ) *дискретно-волнового критерия*  $B_\lambda$  микроразрушения:

$$B_\lambda = \lambda_B / \langle a \rangle = 2,6 \pm 0,5 ; \quad B_\lambda \cong 2,6; \quad \lim_{L_k \rightarrow \lambda_k} K = \lambda_k / l_k = \lambda_B / \langle a \rangle \cong 2,6, \quad (1)$$

где  $\langle a \rangle$  – среднее расстояние между атомами в твердом теле,  $\lambda_B$  имеет смысл наименьшей длины цуга акустической волны при разрыве межатомных связей активированного атома.

В согласии с автоколебательной моделью акустической эмиссии [3, 5] длина волн  $\lambda_k$  акустического излучения в очаге разрушения совпадает по порядку величины со средним расстоянием  $L_k$  между трещинами, а проявление принципа автомодельности разрушения на любом масштабном уровне задает связь длины акустических волн  $\lambda_k$ , возникающих при разрывах, с длиной трещин  $l_k$  согласно соотношениям

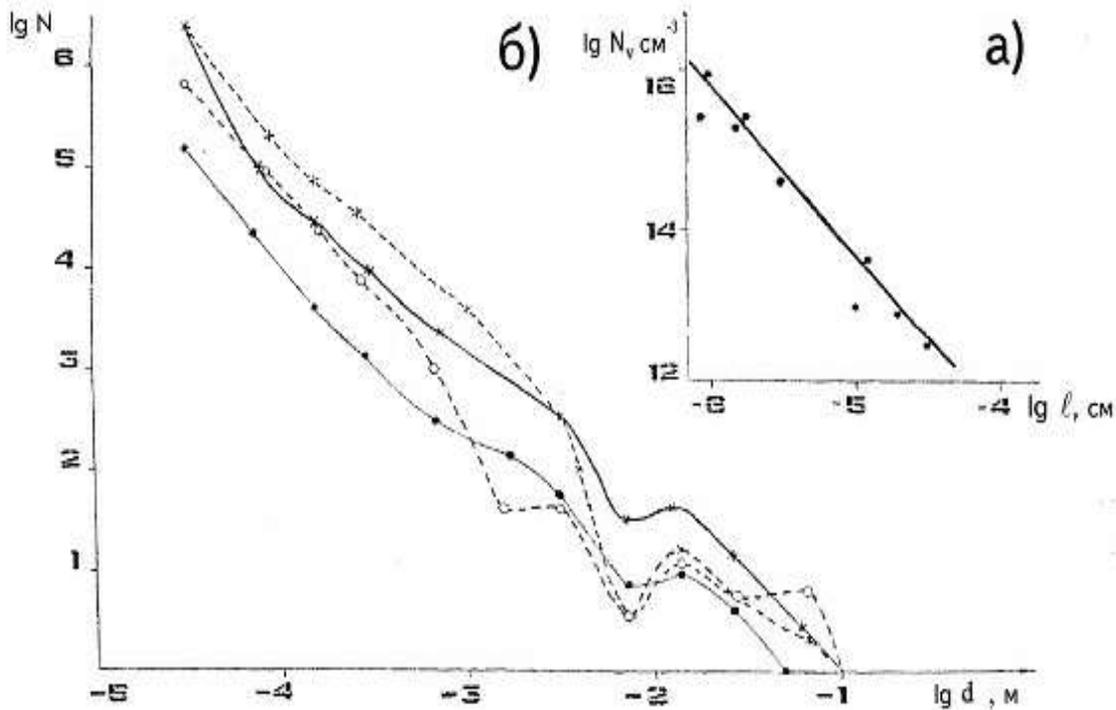
$$l_k = a (\lambda_B / a)^k ; \quad \lambda_k = a (\lambda_B / a)^{k+1} ; \quad \lambda_k / l_k = \lambda_B / a = B_\lambda \quad (2)$$

Из закономерности (2), обусловленной по сути единством дискретной и волновой природы разрушения, следует, что формирование гранулометрии частиц задается участием геометрической прогрессии (для ряда  $d_k/d_{k-1}$  преимущественных размеров частиц), основанием которой служит величина  $B_\lambda$  дискретно-волнового критерия микроразрушения. Действием критерия  $B_\lambda$  объясняется появление максимумов в распределениях по размерам разрушенных частиц: один максимум связан с длиной излучаемой волны  $\lambda_k$  (или расстоянием  $L_k$  между трещинами), а второй – с размером разрыва  $l_k$ .

На рис. 1 показаны распределения  $N(d)$  по размерам  $d$  числа  $N$  измельченных частиц при разрушении одноосным сжатием образцов железной руды и мрамора ( $V = 54 \text{ см}^3$ ). Здесь же (рис. 1а) в двойных логарифмических координатах приведено для сравнения распределение  $N_V(l)$  по размерам ( $l$ ) численности  $N_V$  (на единицу объема) микротрещин в полимерных материалах в предразрывном состоянии, однозначно связанное с их размерами.

В работах [6,17,18] изучено применение метода АЭ для оценки гранулометрии разрушенных модельных образцов геоматериала. Измеряя в процессе деформирования удельный счет  $N/V$  акустических сигналов, возможно прогнозировать характерный размер  $d_x$  частиц и объемную долю  $\gamma = \Delta V/V$  этой

фракции:  $d_x = (V/N)^{1/3}/B_\lambda$ ;  $\gamma \cong (l^2 \delta) N/V$  ( $V$  – объем образца,  $\sigma$ ,  $l$  – характерные продольный и поперечный размеры зерен, по границам которых возникают микроразрывы).



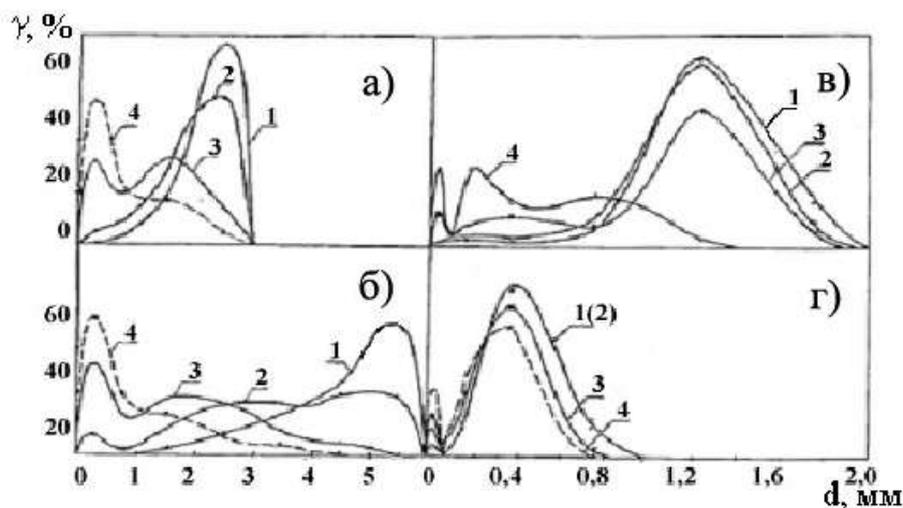
а – полимер (—); б – железная руда (---); б – мрамор (— · —)

Рисунок 1 - Графики распределений по размерам предразрывных трещин  $N_V$  (а) и измельченных частиц  $N$  (б)

Реальность исследования распределений измельченных частиц на основе изложенных закономерностей представляется естественной, поскольку акт диспергирования завершает любой процесс разрушения, а эффекты диспергирования сопровождают его, являясь в конечном итоге следствием дискретности строения нагруженной среды и дискретно-волновых проявлений механизма саморазрушения через автовозбуждение активности вещества.

На рис. 2 показаны гранулометрические характеристики продуктов измельчения железной руды свободным ударом при крупности  $D=0,5-6,0$  мм и скорости удара  $v = 25-200$  м/с ( $\gamma$ -массовая доля фракций менее  $d$ , %).

Для большого числа (более шести десятков) экспериментальных гранулометрических характеристик разнообразных дробленых и измельченных геоматериалов, изучали изменение величины  $d_k / d_{k-1}$  отношения последовательно расположенных преимущественных размеров  $d_k$  и  $d_{k-1}$  частиц. Исследовались поли- и мономинеральные порошки с различными свойствами, включая: железистые кварциты, оловосодержащая и медно-никелевая руда, талько-магнезит, глинозем, электрокорунд, шамот, цемент, уголь, марганцевый и пирротинный концентраты.



1- 25; 2 - 50; 3 - 100; 4 - 200;  $D(\text{мм})$ : а) 2-3; б) 3-6; в) 1-2; г) 0,5-1

Рисунок 2 - Изменение распределений по размерам продуктов измельчения железной руды свободным ударом со скоростью  $v$  (м/с)

Диапазон крупности исследуемых материалов составлял  $10^{-5}$ - $10^{-1}$  м, плотности  $1,5$ - $6 \text{ г/см}^3$ , твердости по десятибалльной шкале 1-9. Анализировались продукты обработки в конусной, инерционной, центробежной дробилках, шаровой, рудногалечной, аэродинамической, вибрационной и струйной мельницах. Длительность нагружения (раздавливание, удар, истирание, термомеханическое действие) изменяли в от долей секунды до нескольких часов в зависимости от способа и режима измельчения. Модуль классификации при анализах гранулометрии составлял характерную для лабораторного исследования величину от 1,6 до 2,3.

В таблице 1 приведены значения отношения  $d_k/d_{k-1}$  последовательно расположенных преимущественных размеров частиц - как показателя оценки формирования гранулометрии частиц.

Таблица 1 - Показатели формирования гранулометрии частиц при дроблении и измельчении

Процесс	Преимущественный размер в распределении частиц, мм	Отношение $d_k/d_{k-1}$	Среднее значение $d_k/d_{k-1}$
Дробление	228±77	3,1±1,7	3,4±1,4
	74±16	4,9±2,4	
	15±4	3,0±1,4	
	5±1	3,3±0,8	
	1,5±0,1	4,0±1,5	
	0,37±0,12	2,2±0,9	
Измельчение	$(170±14) \cdot 10^{-3}$	2,3±0,5	2,6±0,6
	$(74±11) \cdot 10^{-3}$	2,3±0,4	
	$(32±2) \cdot 10^{-3}$	2,7±0,7	
	$(11,7±1,8) \cdot 10^{-3}$	3,3±1,2	
	$(3,5±0,8) \cdot 10^{-3}$	-	
			3±1

Как видим, в области измельчения величина соотношения  $d_k/d_{k-1} = 2,6 \pm 0,6$  хорошо согласуется с пределами изменения для большинства твердых тел дискретно-волнового параметра, предсказанными автоколебательной теорией:  $\lambda_D / a = 2,1-3,1$  [116]. С увеличением масштаба разрушения при анализе дробленых продуктов наблюдается  $d_k/d_{k-1} = 3,4 \pm 1,4$ . Таким образом, развитие размерной упорядоченной иерархии структурных уровней в конденсированных системах осуществляется при достижении в локальных зонах дискретно-волновой неустойчивости атомной решетки, контролируемой согласно теории В.Н. Бовенко критерием  $B_\lambda = \lambda_B / \langle a \rangle$ . Наблюдаемое совпадение интервалов изменения  $d_k / d_{k-1}$  и критерия  $B_\lambda$  может служить объяснением введенной М.А. Садовским иерархической блоковой модели геофизической среды [11,13].

Поскольку преимущественные размеры образующихся фрагментов кратны величине  $B_\lambda$  критерия микроразрушения, представляется возможным устанавливать характеристики распределений по размерам трещин (фрагментов) на различных иерархических уровнях деформации геосреды, а на основе распределений по размерам структурных элементов и развивающихся трещин реализовать методом АЭ прогнозирование гранулометрии частиц измельченного продукта.

Проведенный анализ закономерностей формирования гранулометрии частиц в процессах дробления и измельчения позволяет считать, что сопоставление измельченных продуктов следует проводить при соблюдении постоянства модуля их классификации, причем, величина модуля принимается равной среднему расчетному значению дискретно-волнового критерия. В области анализа более крупнодробленых продуктов ( $d \geq 10^{-3}$  м), величина модуля может задаваться близкой к интервалу изменения концентрационного параметра с учетом его размерного эффекта [12].

### **Выводы.**

1. Проявление закономерности выполнения геометрической прогрессии для ряда преимущественных размеров на графиках функций распределения измельченных частиц показало определяющую роль дискретно-волнового критерия микроразрушения (среднее значение  $B_\lambda \cong 2,6$ ) в формировании и развитии иерархии размеров частиц в нагружаемом геоматериале.

2. Изучение экспериментальных гистограмм продуктов измельчения в широком диапазоне масштабов подтвердило полимодальность в распределении по размерам частиц. При этом отношение последовательно расположенных преимущественных размеров совпадает с интервалом расчетной величины дискретно-волнового критерия микроразрушения для большинства твердых тел.

3. Основой сравнительного исследования гранулометрии измельченных (диспергированных) материалов следует считать полимодальный закон распределения частиц по размерам, в согласии с которым обязательно соблюдение величины модуля классификации на уровне значения дискретно-волнового критерия микроразрушения  $B_\lambda = 2,1-3,1$ .

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Куксенко В.С. Микромеханика разрушения материалов: Автореф. дис...д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07/Ин-т высокомолек. соедин.-Л., 1977. - 36 с.
2. Куксенко В.С. Кинетические аспекты процесса разрушения и физические основы его прогнозирования // Прогноз землетрясений, 1984, № 4, С. 8-20.
3. Бовенко В.Н. Основные положения автоколебательной модели предразрушающего состояния твердых тел // ДАН СССР,-1986, Т. 286, № 5, С. 1097-1101.
4. Бовенко В.Н. Синергетические эффекты и закономерности релаксационных колебаний в состоянии предразрушения твердого тела: Автореф. дисс. д-ра физ.-мат. наук: М.: 1990, 30 с.
5. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. Применение автоколебательной теории разрушения для прогнозирования энергоемкости процесса измельчения твердых тел // ФТПРПИ, 1986, № 1, С. 106-111.
6. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых. Автореф. дисс. д-ра техн. наук, Днепропетровск: НГУ, 2004, 35 с.
7. Горобец Л.Ж., Верхоробина И.В. Трансформация энергии на стадии диспергирования нагружаемой геосреды, Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр., 2017, Вып. 136, С. 107-115.
8. Чупрынин В.И. Разрывные автоколебания в геофизических системах, М.: Наука, 1983, 92 с.
9. Горобец Л.Ж., Верхоробина И.В. Принципы и показатели функционирования геосреды при нагружении, Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр., 2016, Вып. 129, С.122-135.
10. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. О проявлении дискретности твердых тел // ДАН СССР, 1987, Т. 292, № 5, С. 1095-1100.
11. Гейликман М.Б., Писаренко В.Ф. О самоподобии в геофизических явлениях. Дискретные свойства геофизической среды / Под ред. Садовского М.А., М.: Наука, 1989, С. 109-131.
12. Петров В.А., Горобец Л.Ж. Размерный эффект концентрационного порога разрушения // Изв. АН СССР. Физика земли, 1987, № 1, С. 95-98.
13. Веттергрен В.И. Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Крючков М.А. Кинетика и иерархия процесса накопления трещин в гетерогенных материалах. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / Ред. Леонтьев А.В., Новосибирск: Институт горного дела. 2004. С. 373-377.
14. Лютый А.И., Поповченко С.Е. Строение Земли и геологические процессы в свете релаксации упругой энергии вещества недр: Монография, Днепропетровск: НГУ, 2005, 272 с.
15. Бовенко В.Н., Старцев В.М. Дискретно-волновая природа надмолекулярной организации аморфного полимера //Высокомолек. соедин., Серия Б., 1994, Т. 36, № 6, С. 1004-1008.
16. Бовенко В.Н., Герасимов Р.Ю., Горобец Л.Ж. Радиоспектроскопия продуктов сверхтонкого измельчения // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. Аннотации докладов. В 3 томах. Т.2. Нанофизика и нанотехнологии. Фундаментальные проблемы науки, М.:НИЯУМИФИ, 2010, С. 73-74.
17. Горобец Л.Ж., Шуляк И.А., Верхоробина И.В., Методика исследования и оценки показателей диспергирования горных пород, Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ", №51, 2005, с.132-138.
18. Бовенко В.Н., Горобец Л.Ж. Дискретно-волновая природа диспергирования // Науковий вісник НГУ, 2008, №1, С. 7-9.

## REFERENCES

1. Kuksenko V.S. (1977), «Micromechanics destruction of materials», Abstract of D.Sc.dissertation, 01.04.07, Institute of vysokomolek. soedin., Leningrad, SU.
2. Kuksenko V.S. (1984) "Kinetic aspects of the process of destruction and the physical basis of its prediction", *Earthquake prediction*, no 4. p. 8-20.
3. Bovenko V.N. (1986) "The main provisions of the self-oscillatory model of the pre-destructive state of solids", *Reports of the Academy of Sciences USSR*, Vol. 286, no 5, pp. 1097-1101.
4. Bovenko V.N. (1990), «The synergetics effects and conformities to law of relaxation vibrations in a state of pre-destruction of solid», Abstract of Ph.D. dissertation, 01.04.07, Institute MIEM, Moscow, SU.
5. Bovenko V.N. and Gorobets L.Zh. (1986), "Application of the self-oscillation theory of fracture to predict the energy intensity of the grinding process of solid bodies", *Physical and technical problems of mining*, no 1, pp. 106-111.
6. Gorobets L.Zh. (2004), «Development of scientific foundation for the solid minerals grinding», Abstract of D.Sc. dissertation, Mineral dressing, National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.
7. Gorobets L.Zh. and Verkhobina I.V. (2017), «Energy transformation at the stage of dispersion of loaded geomeidia», *Geotechnical Mechanics*, Issue 136, p. 107-115.
8. Chuprynin V.I. (1983), *Razryvnye kolebaniya v geofizicheskikh sistemakh* [Break self-excited oscillations in geophysical systems], Nauka, Moscow, SU.
9. Gorobets L.Zh. and Verhorobina I.V. (2016), "Principles and indexes of functioning of geological environment at a ladening", *Geo-Technical Mechanics*, Vol. 129, pp.122-135.
10. Bovenko V.N. and Gorobets L.Zh. (1987), "About the display of discreteness of solids", *RAS of the USSR*, vol. 292, no. 5, pp. 1095-1100.
11. Geylikman M.B. and Pisarenko V.F. (1989), "About selfsimilarity in the geophysical phenomena. Discrete properties of geophysical environment", Moscow: Nauka, 1989, pp. 109-131.
12. Petrov V.A. and Gorobec L.Zh. (1987), "The size effect of concentration threshold of destruction", *Izvestiya AN USSR*.

*Physics of earth*, no. 1, pp. 95-98.

13. Vettegren V.I., Kuksenko V.S. and Tomilin N.G. (2004), «Kinetics and hierarchy of process of accumulation of cracks in heterogeneous materials», Geological dynamics and tense state of bowels of Earth, Novosibirsk: Institut gornogo dela, 2004, pp. 373-377.

14. Luty A.I. and Popovchenko S.E. (2005), Stroyeniye Zemli i geologicheskiye protsessy v svete relaksatsii uprugoy energii veshchestva nedr, Monographiya [Structure of Earth and geological processes in the light of relaxation of resilient energy of substance of bowels of the earth], NMU, Dnepropetrovsk, UA.

15. Bovenko V.N. and Startsev V.M. (1995), "Discrete-wave nature of the supramolecular organization of an amorphous polymer", *High molecular weight compounds*, no. 6, vol. 36, p. 1004–1008.

16. Bovenko V.N., Gerasimov R.U. and Gorobets L.Zh. (2010), "Radio-location spectroscopy of foods of the overmicronizing", *Scientific session NIYAU MIFI, Lemmatas of lectures, in 3 volumes, t.2. Nanophysics and nanotechnologies. Fundamental problems of science*, Moscow: NIYaUMIFI, pp. 73-74.

17. Gorobets L.Zh., Shulyak I.A. and Verhorobina I.V. (2005), "Methods of research and evaluation of indicators of dispersion of rocks", *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*, no. 51, p. 132-138.

18. Bovenko V.N. and Gorobets L.Zh. (2008), "Discrete-wave nature of dispersing", *Naukoviy visnik NGU*, no. 1, pp. 7-9.

---

#### Об авторах

**Горобец Лариса Жановна**, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Днепропетровская Политехника» (НТУ «ДП»), г. Днепр, Украина, [larisa-gorobets@rambler.ru](mailto:larisa-gorobets@rambler.ru)

**Верхоробина Инна Владимировна**, магистр, инженер в отделе геодинамических систем и вибрационных технологий, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), г. Днепр, Украина, [inna\\_kuchuk@ukr.net](mailto:inna_kuchuk@ukr.net)

#### About the authors

**Gorobets Larisa Zhanovna**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Professor, National Technical University «Dnipro Polytechnic» (NTU «DP»), Dnepr, Ukraine, [larisa-gorobets@rambler.ru](mailto:larisa-gorobets@rambler.ru)

**Verkhorobina Inna Vladimirovna**, Master of Sciences, Principal Engineer of Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, [inna\\_kuchuk@ukr.net](mailto:inna_kuchuk@ukr.net)

**Анотація.** Мета роботи полягає в узагальненні закономірностей формування розподілів частинок за розмірами при руйнуванні (подрібненні) матеріалів з позицій нових відкриттів у фізиці руйнування і сучасних знань щодо розвитку фрагментації у навантаженому геоматеріалі, зокрема, з урахуванням дискретно-хвильової природи речовини, авторезонансного механізму руйнування (диспергування) і фрактального закону про полімодальний розподіл частинок за розмірами. Розглянуто закономірності формування розподілів за розмірами подрібнених частинок при руйнуванні з урахуванням зв'язків, які задають структуру і рівень накопичення енергії до моменту розпаду твердого тіла на фрагменти і окремі частини. Важливим фактором взаємодії і укрупнення мікротріщин є гетерогенність структури тіла, що навантажуються. Обґрунтовано фізичні принципи, критерії та параметри еволюції фрагментування при навантаженні геологічного матеріалу. У розвитку ефектів диспергування провідна роль відводиться стадії авторезонансу. Принцип автомодельності руйнування на будь-якому масштабному рівні задає зв'язок довжини акустичних хвиль при розривах з довжиною тріщин. Сформульовано наукові передумови вивчення гранулометрії зруйнованих частинок. Новий підхід до вирішення поставленого завдання включає використання зв'язку дискретно-хвильового критерію мікроруйнування з процесом диспергування. Дано фізичне пояснення закономірності появи максимумів на кривих розподілу частинок за розмірами. Процес формування гранулометричного складу частинок при руйнуванні (дрібленні, подрібненні) реалізується з участю закономірності виконання для ряду характерних розмірів частинок геометричної прогресії, основою якої служить величина дискретно-хвильового критерію мікроруйнування  $B_\lambda = 2,1-3,1$ . Наведено приклади дослідження підтверджують принцип подібності розподілів тріщин і окремої частини. Оскільки характерні розміри частинок, що утворюються, кратні величині  $B_\lambda$ , представляється доцільним при оцінці гранулометрії подрібнених продуктів дотримання величини модуля класифікації на рівні значення дискретно-хвильового критерію мікроруйнування.

**Ключові слова:** геологічні матеріали, тріщина, руйнування, дискретно-хвильовий критерій, подрібнення, гранулометрія.

**Annotation.** The purpose of work consists of generalization of conformities to the law of forming of distributing of particles on sizes at destruction (growing shallow) of materials from positions of new discoveries in physics of destruction and modern knowledges about development of fragmentation in loaded geomaterial, in particular, taking into account discretely-wave nature of matter, autoresonance mechanism of destruction (dispersion) and fractal law about the polymodal distributing of particles on sizes. The laws of formation of by-size distributions of crushed particles at geomaterial destruction are considered with taking into account bonds, which determine structure and level of energy

accumulation to the moment of the solid disintegration into fragments and partings. An important factor in the microcrack interaction and coalescence is heterogeneity of the loaded body structure. Physical principles, criteria and parameters of the fragmentation development under geological material loading are substantiated. The leading part in development of dispersion effects is assigned to the autoresonance stage. Principle of self-similarity of destruction at any scale level sets the relationship between the length of acoustic waves during discontinuities and the length of cracks. Scientific background for the study of the destroyed particle granulometry is formulated. A new approach for solving the problem under the study assumes the use of interrelations between discrete-wave criterion for microdestruction and the dispersion process. A physical explanation is given to the pattern of appearance of maxima in curves of the particle distribution by their sizes. The process of forming the particle distribution by size during destruction (crushing, grinding) is realized through the pattern of geometric progression for some typical particle sizes, the basis for which is value of criterion of discrete-wave microfracture  $B_\lambda = 2,1-3,1$ . The examples of the study confirm principle of similarity of the crack and parting distributions. Since typical sizes of the formed particles are multiples of the value of  $B_\lambda$ , it seems appropriate, when evaluating the crushed products granulometry, to keep a value of the classification module at the level of discrete-wave criterion of microfracture.

**Key words:** geological materials, crack, fracture, discrete-wave criterion, grinding, granulometry.

*Стаття надійшла до редакції 8.05.2018*

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Б.О. Блюссом.*