

УДК 539.171.4

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ ЯВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ КРИТИЧЕСКИМ ПОВЕДЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

© 2024 г. Н. И. Сельченкова^а, А. Я. Учаев^{а, *}

^аРоссийский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Саров, Нижегородская обл., 607188 Россия

*E-mail: uchaev@expd.vniief.ru

Поступила в редакцию 29.02.2024 г.

После доработки 06.03.2024 г.

Принята к публикации 12.03.2024 г.

В работе рассмотрены универсальные признаки явления динамического разрушения и турбулентности на основе анализа результатов исследований и литературных данных. В явлении динамического разрушения плотность поглощенной энергии, приводящая к разрушению, сравнима с энергетическими параметрами кристаллической решетки $E \sim$ доли эВ/атом, в диапазоне неравновесных состояний $t \sim 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-10}$ с. Макроразрушение, меняющее связность тела, возникает при достижении критической плотности каскада центров разрушения – перколяционного кластера, через каскад бифуркаций. Развитая турбулентность является хаотической динамикой, которая связана со стохастической неустойчивостью, перехода, например, через последовательность бифуркаций удвоения периода, через перемежаемость и т.д. В настоящее время строгая математически обоснованная теория явления динамического разрушения конденсированных сред и теория турбулентности отсутствуют, что предполагает для их описания применение скейлинговых соотношений и феноменологических подходов. На основе результатов расчетно-теоретических исследований и анализа литературных данных показана аналогия явлений динамического разрушения металлов и развитой турбулентности, которая заключается в том, что эти процессы имеют близкие значения критических индексов, и попадают в один класс универсальности.

Ключевые слова: ударно-волновое нагружение, критические явления в конденсированных средах, динамическое разрушение металлов, развитая турбулентность, степенные распределения

DOI: 10.56304/S207956292406037X

ВВЕДЕНИЕ

Явления динамического хаоса, самоорганизации связано со стохастической неустойчивостью и критическим поведением нелинейных физических систем различной природы. Эти процессы возникают, например, в развитой турбулентности, явлении динамического разрушения конденсированных сред. В основе хаотического поведения динамических систем, степенных законов распределения фрактальных объектов лежит понятие самоподобия, которое является одной из форм симметрии. Симметрия – инвариантное поведение системы при каких либо преобразованиях, например, одна из форм симметрии – инвариантность относительно геометрических преобразований. Универсальность простого движения является линейность физических систем и инвариантность при трансляциях в пространстве и во времени, описывающих их поведение.

Однако, в большинстве существующих явлений линейность нарушается и вместо периодиче-

ского движения возникает аperiodическое, хаотическое движение, не обладающее инвариантностью при аддитивных сдвигах, и проявляющее инвариантность при мультипликативных изменениях масштаба. В общем случае одно из следствий самоподобия – возникновение объектов с определенной структурой (фракталы).

В работе рассмотрены универсальные признаки явления динамического разрушения и турбулентности на основе анализа результатов исследований, полученных ранее [1–6], и литературных данных [7–9].

Автор работы [10] отмечает, что для исследования неравновесных систем требуется расширение функционального пространства, и отсутствие адекватного математического аппарата создает ряд проблем. Неустойчивость неравновесных процессов разрушает траектории в фазовых пространствах (при сколь угодно точном задании начальных условий). Следовательно, статистическое описание системы становится единственно возможным. “В

понимании законов природы фракталы играют решающую роль” [10].

Монофрактал наиболее простая модель для описания реальных объектов. В общем случае самоподобное множество может представлять собой суперпозицию фрактальных подмножеств, характеризующих собственными значениями фрактальных размерностей. В естественных науках (физике, химии, геологии, ...) при исследовании процессов роста, перемешивания возникает ряд явлений, для количественного описания которых необходимо применение понятия фрактала на структуры с определенным числом показателей скейлинга. Такие структуры могут характеризоваться спектром показателей, где размерность Хаусдорфа — одна из них [8, 9].

В динамических неравновесных физических системах различной природы при определенных условиях могут возникать стохастическая неустойчивость и критическое поведение элементов системы, связанные с явлениями динамического хаоса, ростом корреляций, самоорганизацией. Так в явлении динамического разрушения металлов при высокоинтенсивном внешнем воздействии макроразрушение, меняющее связность тела, возникает при достижении критической плотности каскада центров разрушения — перколяционного кластера, являющегося фрактальными кластерами.

Плотность поглощенной энергии, приводящей к разрушению, сравнима с энергетическими параметрами кристаллической решетки $E \sim \sim$ доли эВ/атом, в диапазоне неравновесных состояний $t \sim 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-10}$ с. Причем переход неравновесной системы (разрушаемого тела) через каскад бифуркаций с нано- на макроуровень контролируется концентрационным критерием [1–6].

Согласно авторам работ [11, 12], гидродинамическая турбулентность является хаотической динамикой, которая связана с стохастической неустойчивостью. В настоящее время существует несколько сценариев перехода к турбулентному движению: сценарий перехода по Ландау–Хопфу, переход через последовательность бифуркаций удвоения периода [11, 12], переход через перемежаемость и т.д. То есть, в турбулентных потоках крупные вихри порождают мелкие, те в свою очередь порождают более мелкие и так далее.

Однако, в настоящее время строгая математически обоснованная теория явления динамического разрушения конденсированных сред и теория турбулентности отсутствуют, что предполагает для их описания применение скейлинговых соотношений и феноменологических подходов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Приведем результаты исследований, которые показывают, что динамические диссипативные

процессы, такие как явление динамического разрушения и турбулентное течение проявляют универсальные релаксационные признаки. Коротко рассмотрим свойства функциональных итераций. Как правило, квадратичное отображение позволяет описать возникновение хаоса, бифуркации, перемежаемости в различных физических, химических системах.

В неравновесных диссипативных открытых системах в процессе самоорганизации энтропия уменьшается [13]. Откликом системы на внешнее воздействие, согласно принципу Ле Шателье–Брауна, являются процессы, которые стремятся ослабить внешнее воздействие [3–6, 14]. Количественной характеристикой этого принципа является обобщенная восприимчивость; в механических системах — это сжимаемость. Например, в явлении динамического разрушения, сжимаемость связана с возникающим каскадом центров разрушения, который является фрактальным кластером. Фундаментальные свойства явления динамического разрушения вытекают из масштабной инвариантности пространственно-временных диссипативных структур. Для реализации будущего состояния неравновесная диссипативная система проходит через каскад бифуркаций, что делает эволюцию системы необратимой. Это, с одной стороны, исключает описание системы в параметрах механики, допускающей обращение времени (например, волнового уравнения). С другой стороны, такие уравнения не описывают статистические свойства ансамбля диссипативных структур. Явление динамического разрушения — задача многих тел, в которой определяющую роль играют кооперативные явления, появление дальних корреляций, т.е. состояние системы определяется в большей степени поведением энтропии [3–6].

Ранее подразумевалось, что глубокое понимание нелинейных явлений связано с анализом сложных математических моделей [9]. В последние годы оказалось, что успехи в изучении нелинейных явлений были достигнуты в ходе исследования простых математических моделей — одномерных отображений, зависящих от параметров:

$$x_{n+1} = f(x_n, r), \text{ где } r \text{ — параметр.}$$

Исследования одномерных отображений позволило установить как происходит переход от простых упорядоченных режимов к хаотическим при изменении параметров, применимых к большому классу диссипативных систем. Рассмотрим самоподобие, возникающее в результате мультипликативных итераций с применением квадратичного уравнения — логистической параболы. Такой алгоритм итерации приводит к универсальному поведению нелинейной системы. Логистическая парабола описывает возникновение периодичности циклов нелинейной системы и удвоения периода, возникающего из самоподо-

бия отображений, приводящего к хаосу в нелинейной системе [9].

Закон роста вида

$$x_{n+1} = f(x_n) = r(1 - x_n)x_n, \quad (1)$$

называют квадратичным отображением или логистической параболой, где r – управляющий параметр, x_n – текущее значение величины. Например, в конвекции Рэля–Бенара эта величина может быть температурой (градиентом температуры).

Рассмотрим как ведет себя множество $\{x_n\}$ в зависимости от управляющего параметра r . Для простоты рассмотрим значения x_n в интервале от 0 до 1. Очевидно, что при $r < 1$ значение x_n в уравнении [1] стремится к 0 при $n \rightarrow \infty$; процесс затухает. Если $r > 1$, то последовательность $\{x_n\}$ стремится к постоянному значению $x^* > 0$ (см. рис. 1а). x^* может быть определено из уравнения [1]. При значении $r < 0$ уравнение [1] имеет один неотрицательный корень $x_1^* = 0$. При $r > 1$ корней два $x_1^* = 0$ и $x_2^* = (r - 1)/r$. При $r > 3$ (в нашем случае $r = 3.3$) появляются две особые точки $x_3^* = f(x_4^*)$ и $x_4^* = f(x_3^*)$ (рис. 1б).

Через четыре итерации функция принимает начальное значение. Начав процесс с любой из этих точек, через две итерации мы вернемся к исходной точке. Возникает решение с периодом 2 – бифуркация удвоения периода. При дальнейшем увеличении параметра $r > 3$ возникают четыре особые

точки $x_2^* = f(x_1^*)$ и $x_3^* = f(x_2^*)$, $x_4^* = f(x_3^*)$ и $x_1^* = f(x_4^*)$ (рис. 1в). Появляется следующая бифуркация с периодом 4. При дальнейшем увеличении параметра r появляются циклы с периодом 8, 16 и т.д. (рис. 1г).

Используя квадратичное отображение, получаем каскад бифуркаций, каждая из которых сопровождается удвоением периода, т.е. при увеличении параметра r наблюдается последовательность аттракторов с периодом $2n$, $n = 1, 2, \dots$ При определенном значении $r > r_{кр}$ итерационный процесс перестает проявлять периодические свойства и система переходит в разряд неустойчивых. Такое поведение называется хаосом.

Необходимо отметить, что логистическая парабола обладает самоподобием. В пределе исходная парабола квадратичного отображения становится трансцендентной функцией, которая задается бесконечным степенным рядом [9]. Удвоение периода асимптотически самоподобно с определенным коэффициентом подобия для переменных x . При определенных значениях параметра роста асимптотически возникает бесконечное точечное множество, самоподобное канторово множество, характеризующееся размерностью Хаусдорфа [9].

Отметим, что теория мультифракталов появилась, как математический аппарат для описания общего случая самоподобия, возникающего во многих математических задачах (отображениях) и природных объектах, находящихся в критических состояниях.

Если самоподобное канторово множество характеризуется одним показателем скейлинга – размерностью Хаусдорфа, то мультифракталы характеризуются одним показателем скейлинга и показателем вероятности для фрактального носителя [8, 9].

На рис. 2 приведена логистическая парабола для различных значений управляющего параметра r на интервале x от 0 до 1.

Автор работы [7–9] использовал квадратичное отображение для описания нелинейных систем, в которых происходит удвоение периода и переход системы в хаотическое состояние. Универсальность такого перехода к описанию нелинейных систем заключается в том, что, если система переходит в хаотическое состояние путем удвоения периода (качественная характеристика), ее количественные характеристики становятся полностью определенными. Этот вывод подобен следствиям теории фазовых переходов, в которой некоторые количественные характеристики, например, размерность пространства, определяют универсальные критические показатели [15].

В работе [9] приведен пример поведения логистической параболы при увеличении r от 3 до 4, когда каскад удвоения периода сменяется хаосом ($r \sim 3.83$), который перемежается “окнами периодичности”. Каскад бифуркаций удвоения периода, начинаясь слева, переходит в хаос справа. Полосы хаоса перемежаются “окнами периодичности” (см. рис. 3).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При изучении процессов, протекающих в различных областях естественных наук, встречаются явления, которые требуют для описания расширения понятия фрактала со многими показателями скейлинга (более одного) – мультифракталы. Мультифракталы находят применение для описания ограниченной диффузией агрегации, распределение минералов в поверхности земли, флуктуации намагниченности магнетика, развитой турбулентности. Для мультифрактального анализа экспериментальных данных спектра диссипации энергии в развитой турбулентности вводят показатель τ для линейного интервала и показатель q для вероятности P_i [8, 9].

Как правило, мультифрактальный анализ нелинейных, неравновесных систем, возникающих, например, при росте кластера в результате ограниченной диффузией агрегации, роста вязких пальцев

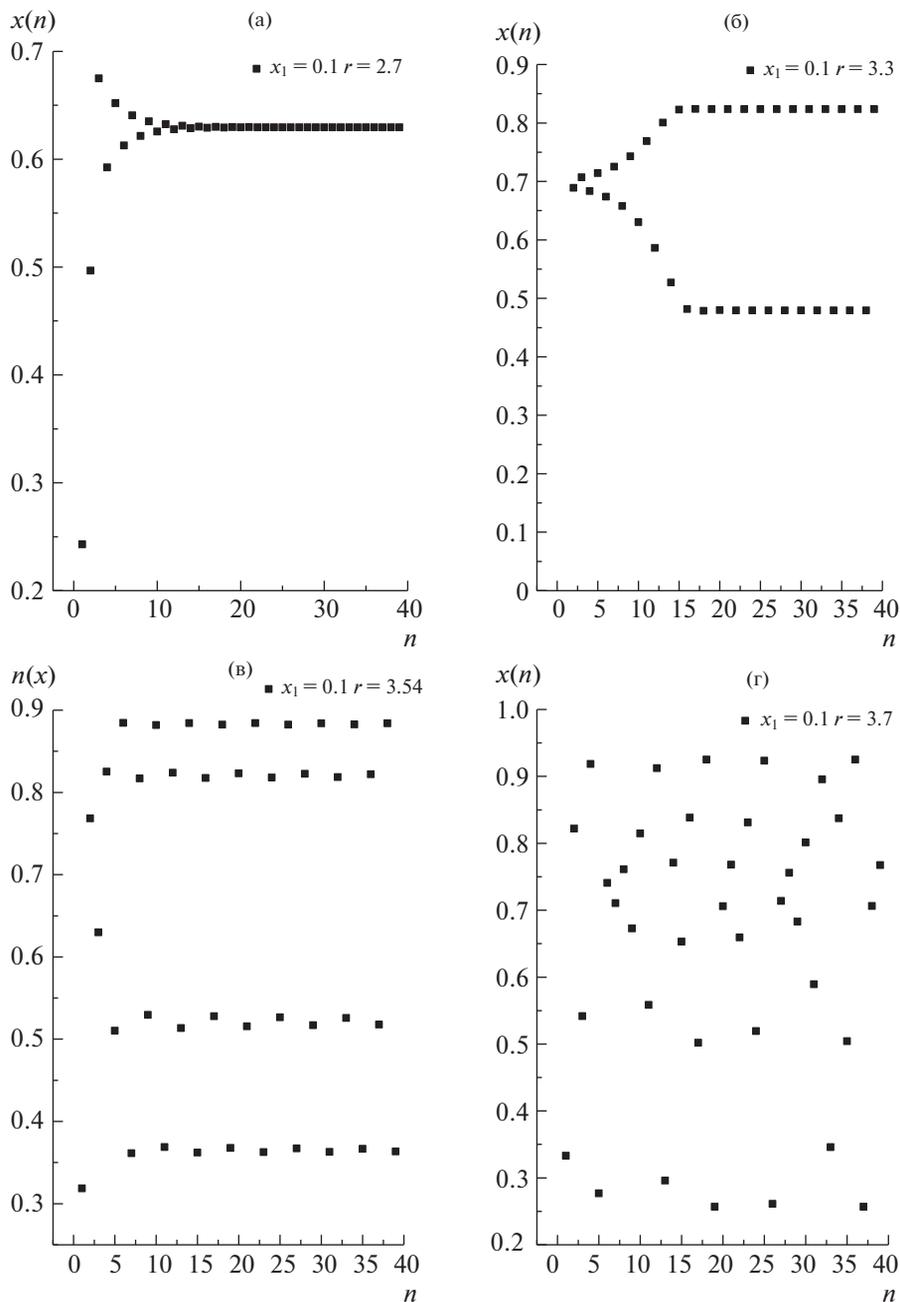


Рис. 1. Поведение системы в зависимости от управляющего параметра r при квадратичном отображении (40 итераций).

при вытеснении жидкостей, конвекции Рэлея–Бенара, определение количественных характеристик каскада диссипативных структур (центров разрушения), гидродинамических мод кристаллической решетки металла в явлении динамического разрушения и т.д. при разбиении исследуемого множества элементов диссипативных структур (кластера) на боксы размером r и определения числа элементов структуры в i -ом боксе, вводится вероятность P_i заполнения i -ого элемента структуры

$$P_i = N_i / N_{\text{tot}} = N_i / \sum N_i; \sum P_i = 1,$$

N_{tot} – полное число элементов множества.

Далее вводится в рассмотрение статистическая сумма

$Z_q = \sum P_{iq}(r)$, q – порядок момента меры множества.

Для самоподобной меры справедлива степенная зависимость статистической суммы $\sum P_{iq}(r) \sim r^{-d}$. Если это соотношение выполняется, то

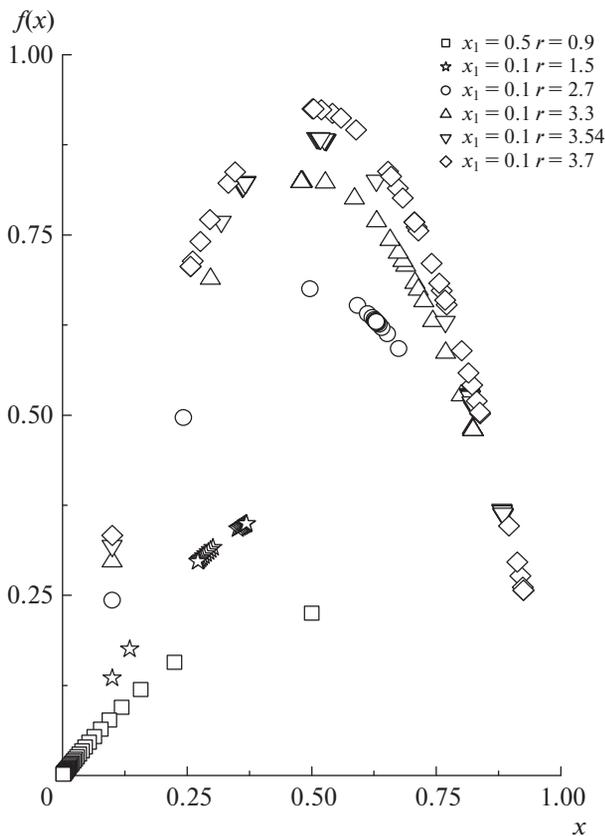


Рис. 2. Логистическая парабола для различных значений управляющего параметра r .

показатель d является функцией q , т.е. $d = \tau(q)$; $\tau(q)$ — показатель массы и описывает неоднородность подобия (скейлинга) меры $\tau(q) = -\ln \sum P_{iq}(r_i) / \ln r_i$. Функция $\tau(q)$ связана со спектром обобщенных фрактальных размерностей $D(q)$: $\tau(q) = (1 - q) D(q)$. $\tau(q)$ при больших $|q|$ может принимать бесконечное значение, поэтому с помощью преобразования Лежандра можно перейти от координат $q, \tau(q)$ к $\alpha, f(\alpha)$. То есть, альтернативным способом описания самоподобной меры является вычисление масштабно-инвариантной функции $f(\alpha)$ — спектр сингулярности, где α — индекс сингулярности [9].

Спектр обобщенных фрактальных размерностей $D(q)$ связан со спектром сингулярности соотношениями

$$\alpha = (dD(q)/dq)(1/(1 - q)),$$

$$f(\alpha) = \alpha q + (1 - q) D(q).$$

В работе [6] приведены мультифрактальные спектры: каскада центров разрушения, каскада полос скольжения в нижней части пирамидки, каскада шероховатости внутренней поверхности центра разрушения в явлении динамического разрушения [1–5, 6]; каскада шероховатости контура внут-

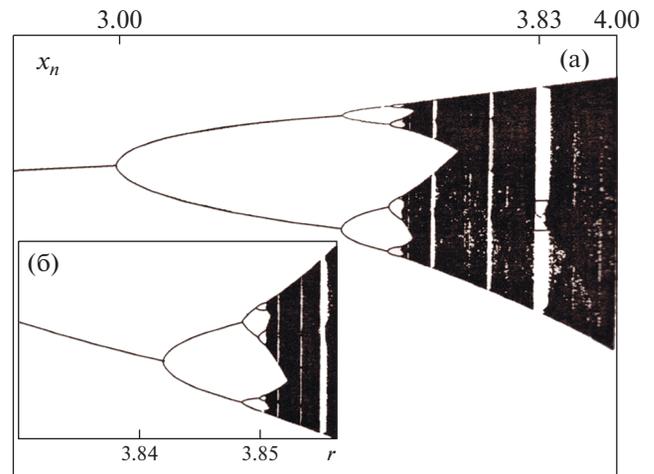


Рис. 3. Итерации квадратичного отображения как функция параметра r .

ренней границы оболочки при ударно-волновом нагружении [2, 5]; пульсации продольной $F_1(k)$ и поперечной $F_2(k)$ компонент скорости осесимметричной струи [10]; рассеяния энергии полностью развитой турбулентности вдоль одномерной прямолинейной траектории в турбулентном потоке [11]; каскада микровихрей турбулентного перемешивания двух несжимаемых жидкостей [6, 9] (см. рис. 4). Сплошная кривая $f(\alpha)$ соответствует процессу мультифрактальному процессу Канторову множеству в пределе $n \rightarrow \infty$ с $P = 0.7$ [8, 9].

На рис. 5 приведен вид полос скольжения кристаллической решетки Си образца после ударно-волнового нагружения $P \sim 2.7$ ГПа (а), гистограмма распределения полос скольжения по размерам (б), фрактальная размерность (в), показатель Херста (г) [3, 4].

Проведем анализ массива данных, определив обобщенную размерность $D(q)$ полос скольжения кристаллической решетки и сравним с литературными данными — мультифрактальным спектром рассеяния энергии полностью развитой турбулентности [9]. Графики мультифрактального спектра имеют вид логистической параболы.

Для построения графика бралось три значения из гистограммы распределения диссипативных структур по размерам, где находится $\sim 90\%$ статистических данных. На рис. 6 приведен график показатель массы $\tau(q)$ и обобщенной фрактальной размерности $D(q)$ каскада полос скольжения кристаллической решетки (гидродинамических мод) — мезо I масштабный уровень, используя массив данных, приведенных на рис. 5б.

На рис. 7а приведено изображение медного образца, полученного на сканирующем туннельном микроскопе (СТМ), подвергнутого импульсному воздействию релятивистских электронных

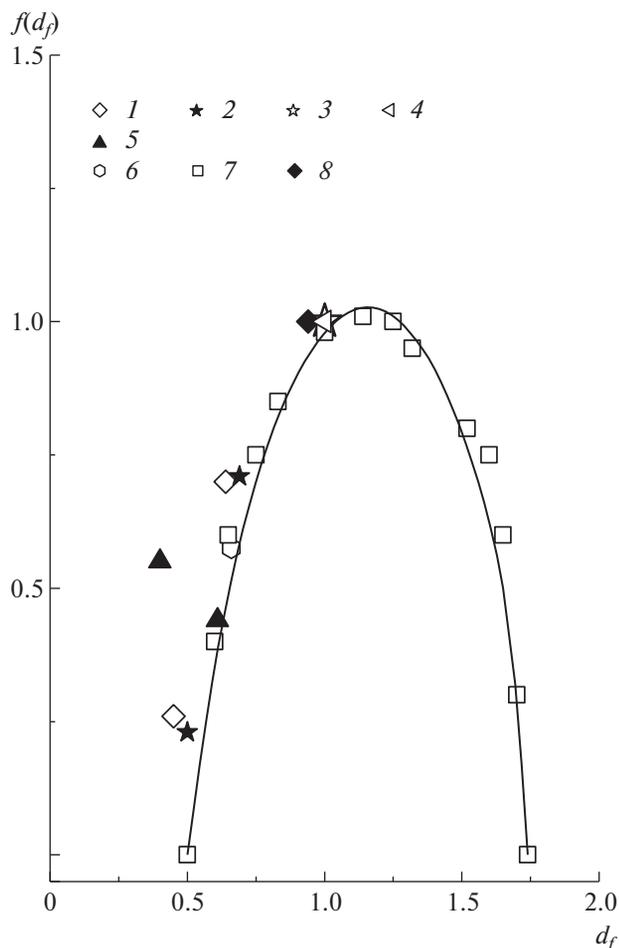


Рис. 4. Мультифрактальные спектры в применении к процессу динамического разрушения металлов (1–4) – [1–5], ударно-волнового нагружения (5) – [2, 5], процесса турбулентности (6, 8) – [6], (7) – [8, 9], сплошная линия – [7–9].

пучков – наноуровень. Результаты обработки шероховатости внутренней поверхности центра разрушения с применением ИСАИ приведены на рис. 7б; фрактальная размерность шероховатости внутренней поверхности центра разрушения $d_f \sim 1.67$.

Проведем мультифрактальный анализ для наномасштабного уровня – шероховатости внутренней поверхности центра разрушения (рис. 7). На рис. 8 приведен график показателя массы $\tau(q)$ и обобщенной фрактальной размерности $D(q)$ шероховатости внутренней поверхности центра разрушения – наномасштабный уровень.

На рис. 9 приведен график показателя массы $\tau(q)$ и обобщенной фрактальной размерности $D(q)$ для мультипликативного процесса с распределением вероятностей $P_1 = 0.618$; $P_2 = 0.382$ (золотое сечение).

Данные, приведенные на рис. 6, 8, 9, хорошо согласуются с результатами исследований для обобщенной фрактальной размерности $D(q)$ каскада полос скольжения кристаллической решетки (гидродинамических мод) – мезо I масштабный уровень и шероховатости внутренней поверхности центра разрушения – наномасштабный уровень, и для мультипликативного процесса с распределением вероятностей $P_1 = 0.618$; $P_2 = 0.382$ (золотое сечение).

На рис. 10 приведен мультифрактальный анализ количественных характеристик процессов динамического разрушения, гидродинамических мод, биномиального мультипликативного отображения с $P = 0.7$: сплошная линия [8], пунктирная – расчет.

Согласно рис. 10, множества каскадов диссипативных структур, возникающих в явлении динамического разрушения и развитой турбулентности, являются подмножествами множества Кантора.

Отметим, что реальные физические системы имеют ограничение снизу – атомарным строением вещества, сверху, например, разрешающей способностью прибора для определения количественных характеристик множества диссипативных структур.

В физических системах вероятностная мера P_i может характеризовать распределение вероятностей появления областей диссипации, например, энергии при переходе системы в критическое состояние. Если геометрические свойства критической системы одинаковы на всех масштабах, то критическое состояние не меняется при изменении масштаба.

Приведем некоторые количественные характеристики поведения металлов в квазистатическом диапазоне долговечности – предел текучести $P_{0.2}$ (см табл. 1). Уравнение состояния Ми-Грюнайзена $P \sim \Gamma \rho E$ (где Γ – параметр Грюнайзена, ρ – плотность материала) позволяет оценить значение энергии соответствующее пределу текучести $P_{0.2}$ [16, 17].

В работе [17] приведены значения критического давления для Al $P_{1кр} \sim 2.4$ кГ/мм² долговечность $t \sim 10^4$ с и $P_{2кр} \sim 6.5$ кГ/мм²; $t \sim 2.4 \cdot 10^{-3}$ с. Значение инварианта $I_1 \sim E_1/(H + L_m) \sim 3.3 \cdot 10^{-3}$; $I_2 \sim E_2/(H + L_m) \sim 8.9 \cdot 10^{-3}$. E_1, E_2 соответствуют $P_{1кр}, P_{2кр}$.

В работе [17] также приведены значения критического давления $P_{кр} \sim 25$ кГ/мм² для Si для долговечности $t \sim 7.7 \cdot 10^{-3}$ с. Оценки показывают, что, отношение $I = E/(H + L_m)$, где E соответствует давлению $P_{кр} \sim 25$ кГ/мм², порядка 10^{-3} . Данные, приведенные в табл. 1 и в работе [17], показывают, что энергия модификации (нагартовки), энергия легирования (сталь) сравнимы с энергией разрушения в квазистатическом диапазоне долговечности. В динамическом диапазоне дол-

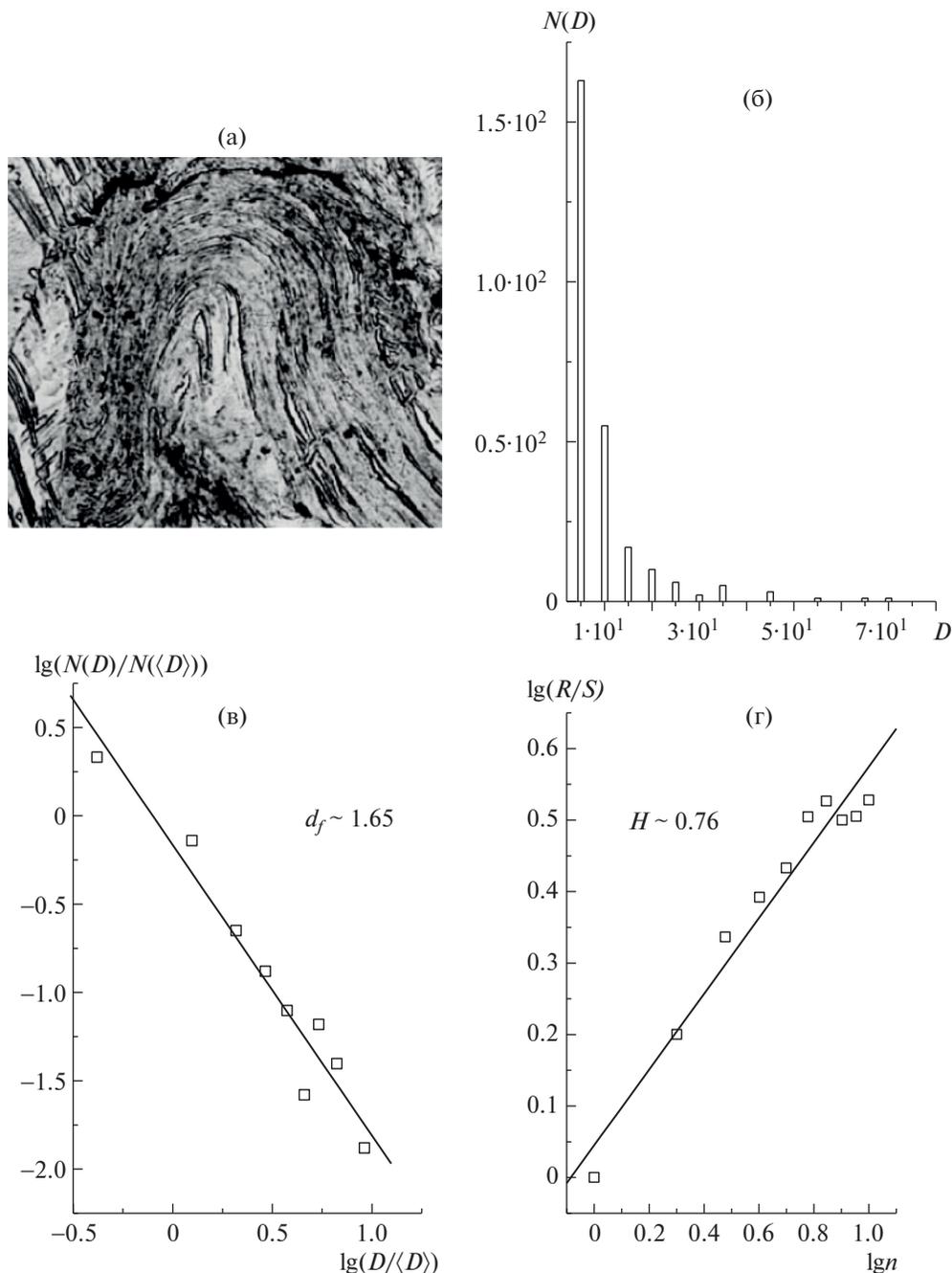


Рис. 5. Вид полос скольжения кристаллической решетки Cu образца после ударно-волнового нагружения $P \sim 2.7$ ГПа ($\times 1000$), гистограмма распределения полос скольжения по размерам, фрактальная размерность, показатель Херста [3, 4].

говечности энергия модификации, энергия легирования составляют доли процентов от энергии разрушения. Вследствие этого, в квазистатическом диапазоне неравновесных состояний модификация и легирование металлов существенно влияют на прочностные свойства [17].

Значение инварианта для термофлуктуационных дислокационных процессов сдвига $P_{0.2}$ в простых металлах и легированных (нагартованных) срав-

нимы со значениями инвариантов для термофлуктуационных процессов разрыва межатомных связей при различных значениях долговечности в квазистатическом диапазоне долговечности и составляют доли процентов от величины инварианта для динамического диапазона долговечности.

Ранее было показано [1, 2], что размер центра разрушения определяется временем образования. Следовательно, являются важными исследования

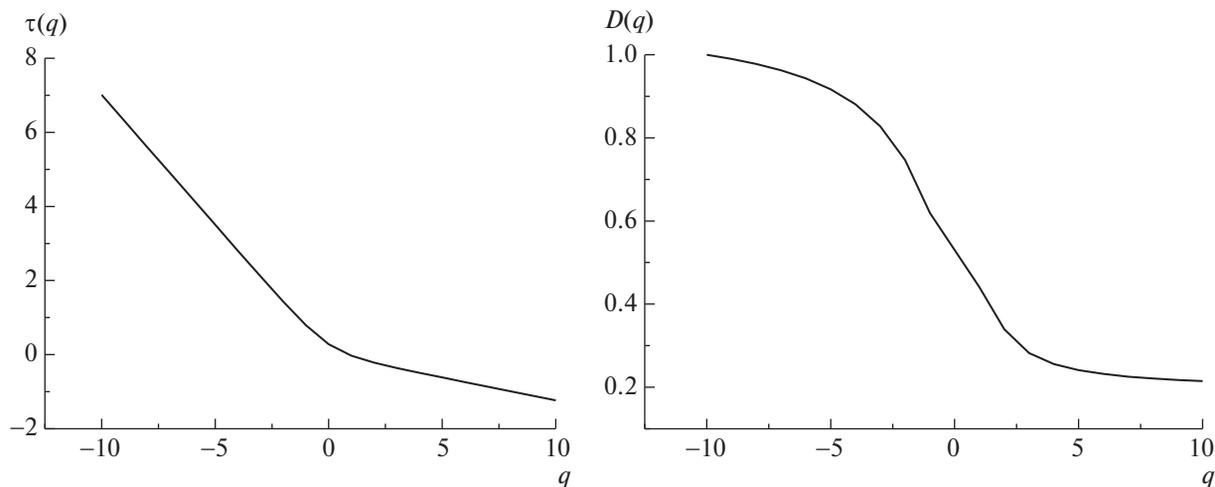


Рис. 6. Показатель массы $\tau(q)$ и обобщенная фрактальная размерность $D(q)$ каскада полос скольжения кристаллической решетки (гидродинамических мод) – мезо I масштабный уровень.

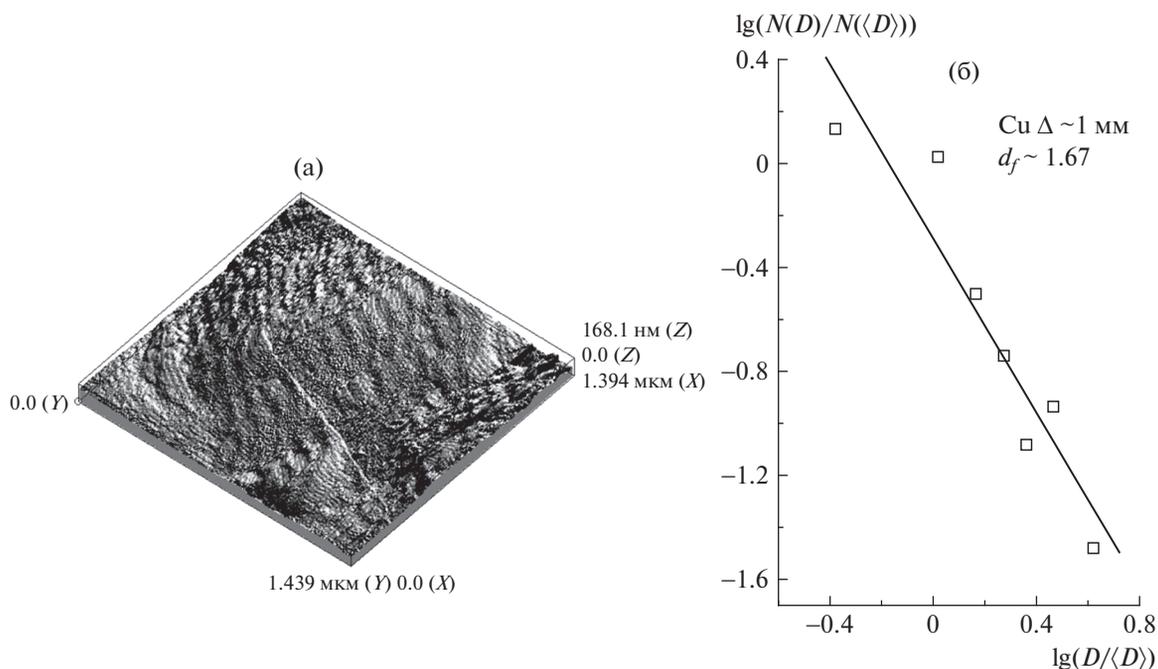


Рис. 7. СТМ-изображение внутренней поверхности центра разрушения медного образца, подвергнутого воздействию релятивистских электронных пучков (а); фрактальная размерность шероховатости медного образца (б) [3, 4].

по мультифрактальному анализу временных интервалов между последовательно происходящими событиями – ряда времени ожидания – возникновения элементов диссипативных структур в нелинейных процессах.

Представление данных в виде ряда ожидания события отличаются от временных рядов, элементами которых является число событий в единицу времени. В этом случае информация о времени каждого события теряется, тогда как, в ряду

времени ожидания информация сохраняется и может быть использована в скейлинговом анализе кинетики возникновения элементов диссипативных структур в явлении динамического разрушения и развитой турбулентности.

В критических явлениях, когда степени свободы ведут себя взаимосвязано, поведение системы определяется фактором кооперативного поведения и природой самих степеней свободы – гидродинамических мод. Так в теории критических явле-

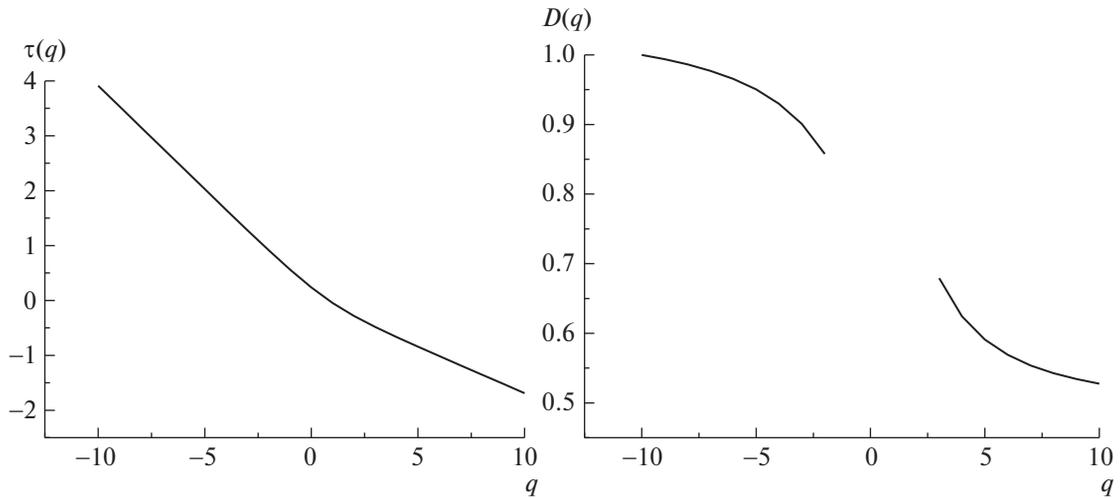


Рис. 8. Показатель массы $\tau(q)$ и обобщенная фрактальная размерность $D(q)$ шероховатости внутренней поверхности центра разрушения – наномасштабный уровень.

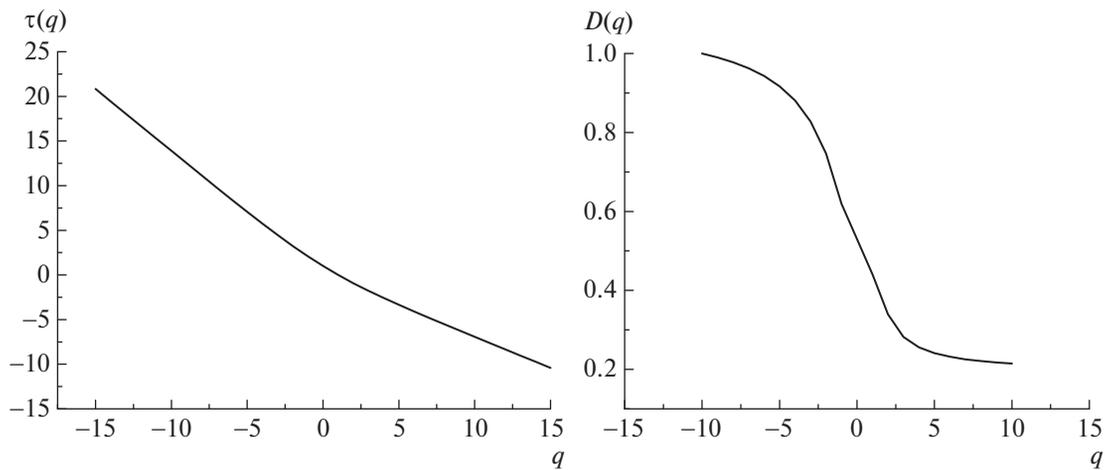


Рис. 9. Показатель массы $\tau(q)$ и обобщенная фрактальная размерность $D(q)$ для мультипликативного процесса с распределением вероятностей $P_1 = 0.618$; $P_2 = 0.382$ (золотое сечение).

Таблица 1. Энергетические параметры ряда металлов в квазистатическом и в динамическом диапазонах долговечности (H – энтальпия, L_m – теплота фазового перехода)

металл	$P_{0,2}$, МПа	E , Дж/г	$I = E/(H+L_m)$ квазистатика	$E_{кр}$, Дж/г для 10^{-8} с	$I = E_{кр}/(H + L_m)$ для 10^{-8} с динамика
Cu _{нагартованная}	380	20	$3 \cdot 10^{-2}$	394	0.55
Cu _{отоженная}	70	3.7	$5 \cdot 10^{-3}$	—	0.55
Fe	170	5.09	$8 \cdot 10^{-3}$	754	0.55
ст. 45	380	20	$1.7 \cdot 10^{-2}$	—	0.55

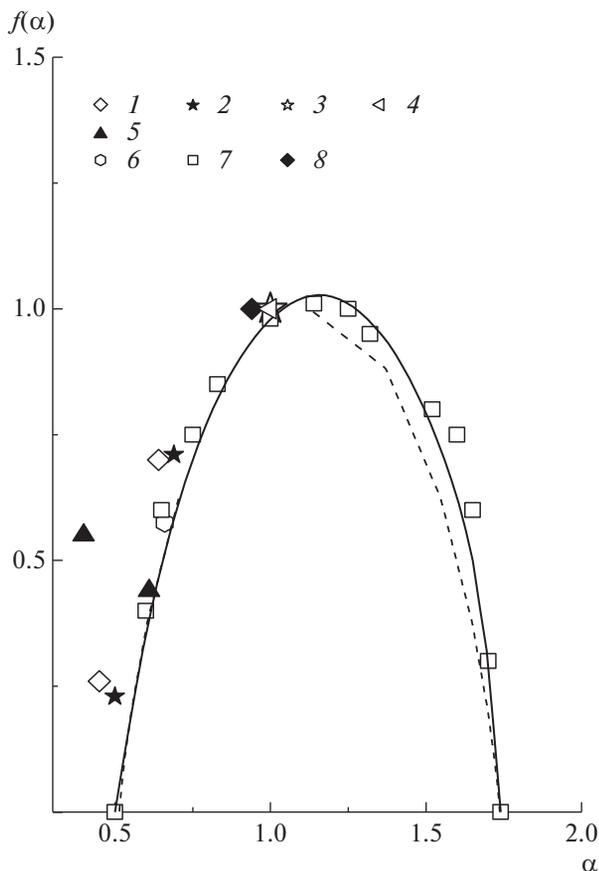


Рис. 10. Мультифрактальные спектры в применении к процессу динамического разрушения металлов (1–4) – [1–5], ударно-волнового нагружения (5) – [2, 5], процесса турбулентности (6, 8) – [6], (7) – [8, 9], сплошная линия – [7–9], пунктир – расчет.

ний возникло понятие универсальности – понятия, что при различных гамильтонианах взаимодействия возникает одинаковое критическое поведение неравновесных систем [15].

Аналогия явлений динамического разрушения металлов и развитой турбулентности заключается в том, что эти процессы имеют близкие критические индексы, управляющие параметры, т.е. попадают в один класс универсальности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрено явление самоорганизации нелинейных неравновесных систем различной природы в широких амплитудно-временных диапазонах. На основе результатов расчетно-теоретических исследований и анализа литературных данных показана аналогия явлений динамического разрушения металлов и развитой турбулентности, которая заключается в том, что эти процессы обладают близкими значениями кри-

тических индексов, т.е. попадают в один класс универсальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Илькаев Р.И., Учаев А.Я., Новиков С.А., Завада Н.И., Платонова Л.А., Сельченкова Н.И. // Докл. Акад. наук. 2002. Т. 384 (3). С. 328–333.
2. Илькаев Р.И., Пунин В.Т., Учаев А.Я., Новиков С.А., Кошелева Е.В., Платонова Л.А., Сельченкова Н.И., Юкина Н.А. // Докл. Акад. наук. 2003. Т. 393 (3). С. 326–331.
3. Кошелева Е.В., Пунин В.Т., Сельченкова Н.И., Учаев А.Я. Общие закономерности иерархических релаксационных процессов в металлах при воздействии импульсов проникающих излучений: монография. 2015. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ.
4. Сельченкова Н.И., Учаев А.Я., Кошелева Е.В. Разрушение металла при воздействии проникающих разрушений: курс лекций. 2021. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ.
5. Сельченкова Н.И., Учаев А.Я. // Ядерная физика и инжиниринг. 2022. Т. 13 (6). С. 558–568 [Sel'chenkova N.I., Uchaev A.Ya. // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85 (10). P. 1744–1753].
6. Сельченкова Н.И., Учаев А.Я. // Ядерная физика и инжиниринг. 2024. Т. 15 (1). С. 48–56 [Sel'chenkova N.I., Uchaev A.Ya. // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86 (9). P. 2076–2084].
7. Фейгенбаум М. // Усп. физ. наук. 1983. Т. 141. С. 343–374.
8. Федер Е. Фракталы. 1991. Москва: Мир [Feder J. Fractals. 1988. New York: Plenum].
9. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы: миниатюры из бесконечного рая. 2001. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика.
10. Пригожин И. Конец определённости. Время, хаос и новые законы природы. 2000. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика [Prigogine I. The End of Certainty. Time, Chaos and the New Laws of Nature. 1997. New York: The Free Press].
11. Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И. // Природа. 1981. № 2. С. 54–65.
12. Синай Я.Г. // Природа. 1981. № 3. С. 72–80.
13. Климантович Ю.Л. // Письма в журнал технической физики. 1988. Т. 14 (7). С. 631–634.
14. Базаров И.П. Термодинамика. Учеб. пособ. для ун-тов. Изд. 2-е перераб. доп. 1976. Москва: Высш. школа.
15. Вильсон К., Когут Дж. Ренормализационная группа и ϵ -разложение. 1975. Москва: Мир.
16. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник. Под ред. Григорьева И.С., Мейлиховой Е.З. 1991. Москва: Энергоатомиздат.
17. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. 1974. Москва: Наука.

Universal Features of Dynamic Failure and Turbulence Phenomena Caused by the Critical Behavior Of Nonlinear Systems

N. I. Sel'chenkova¹ and A. Ya. Uchaev^{1, *}

¹ Russian Federal Nuclear Center All-Russia Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Nizhegorodskaya obl., 607188 Russia

*e-mail: uchaev@expd.vniief.ru

Received February 29, 2024; revised March 6, 2024; accepted March 12, 2024

Abstract—Universal features of dynamic failure and turbulence phenomena are considered on the basis of research results and literature data analyses. The absorbed energy density causing the failure is comparable to the energy parameter of the crystal lattice E , which is fractions of electronvolt per atom in the range of non-equilibrium states $t \sim 3 \cdot 10^{-10} - 10^{-6}$ s. Macrofailure, changing the body connectivity, arises when approaching the critical density of the failure center cascade, i.e., percolation cluster, through the cascade of bifurcations. Fully developed turbulence is a chaotic dynamics, which is related to the stochastic instability of the transition through a sequence of period-doubling bifurcations, through intermittency etc. At present, a strict mathematically grounded theory of dynamic failure phenomena of condensed matters and turbulence theories are absent, which implies the application of scaling relations and phenomenological approaches for their description. On the basis of design-theoretical studies and literature data analysis, it has been shown that phenomena of dynamic metal failure and fully developed turbulence are analogous, meaning that these processes have close values of critical exponents and belong to one universality class.

Keywords: shock-wave loading, critical phenomena in condensed matters, dynamic metal failure, fully developed turbulence, power-law distributions