

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-152-172>

УДК 004.4+621.1+621.373.8

Динамические процессы развития трещиноватости фрактального типа: модели для твердотельного материала камеры энергетической установки в процессе ее эксплуатации

Т. В. Рыжова¹⁾, Д. Н. Бухаров²⁾, М. М. Аракелян³⁾, С. М. Аракелян²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых (Владимир, Российская Федерация),

³⁾Ереванский государственный университет (Ереван, Республика Армения)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Исследованы закономерности формирования и развития дефектов в ответственных металлических деталях и элементах машиностроения, включая энергоустановки и тепловые машины разного класса. Рассмотрены вопросы динамических процессов развития микро- и нанотрещиноватых структур фрактального типа от очагов напряжения в твердотельном материале/металле внутренней камеры с рабочим веществом энергетических устройств в условиях разных режимов их функционирования. При этом регулярность, детерминированность и стохастичность может реализовываться по разным хорошо известным сценариям, что проиллюстрировано на примере ряда режимов. Обсуждается также возможность развития дислокаций и обратимости таких процессов – образования неоднородностей и трещин. Проанализированы модификации и развитие 3D-трещиноватой структуры в материале с использованием простых аналитических соотношений с соответствующими топологическими отображениями внутри материала с выходом фрактальных объектов на поверхность камеры. Хотя проведенный анализ является модельным в общей постановке с известными алгоритмами представления, тем не менее он основан на соответствующих физических принципах, имеет явное практическое значение в аспекте определения тенденций и направлений для оценки надежности и долговечности работы подобных установок. Все это позволяет на качественном уровне оценивать тенденцию в развитии неустойчивостей и дефектов, которые могут приводить в конечном итоге к разрушению твердотельной рабочей камеры различных энергетических установок. Наличие достоверной базы данных по их характеристикам и по режимам работы рабочего вещества в реальных условиях с численными параметрами должно позволить в рамках рассмотренных представлений осуществлять предсказательное моделирование и прогноз долговечности безопасной и устойчивой работы подобных устройств и управлять их режимами с учетом соответствующего метрологического обеспечения.

Ключевые слова: динамические процессы, фрактальные модели, поверхностные дефекты и трещиноватые структуры, управляемые процессы, надежность работы энергетических тепловых установок

Для цитирования: Динамические процессы развития трещиноватости фрактального типа: модели для твердотельного материала камеры энергетической установки в процессе ее эксплуатации / Т. В. Рыжова [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 67, № 2. С. 152–172. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-2-152-172>

Адрес для переписки

Рыжова Татьяна Викторовна
Белорусский национальный технический университет
просп. Партизанский, 77,
220107, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 250-36-95
tatsiana.rizhova@yandex.by

Address for correspondence

Ryzhova Tatiana V.
Belarusian National Technical University
77, Partizansky Ave.,
220107, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 250-36-95
tatsiana.rizhova@yandex.by

Dynamic Processes of Development Jointing of a Fractal Type: Models for a Solid-State Material of the Chamber in a Power Facility during its Operation

T. V. Ryzhova¹), D. N. Bukharov²), M. M. Arakelian³), S. M. Arakelyan²)

¹)Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²)Vladimir State University A. G. and N. G. Stoletovs (Vladimir, Russian Federation),

³)Yerevan State University (Yerevan, Republic of Armenia)

Abstract. The patterns of formation and development of defects in critical metal parts and elements of mechanical engineering, including power plants and heat engines of various classes, have been studied. The issues of dynamic processes of development of micro- and nanojointing structures of a fractal type from stress points in the solid material/metal of the internal chamber with the working substance of energy devices under conditions of different modes of their functioning are considered. At the same time, regularity, determinism and stochasticity can be realized according to various well-known scenarios, which is illustrated by the example of a number of modes. The possibility of dislocation development and reversibility of such processes, such as the formation of inhomogeneities and cracks, is also discussed. The modifications and development of the 3D fractured structure in the material are analyzed using simple analytical relations with the corresponding topological mappings inside the material with the emergence of fractal objects on the surface of the chamber. Although the analysis carried out is a model in the general formulation with known representation algorithms, nevertheless it is based on relevant physical principles and has obvious practical significance in terms of determining trends and directions for assessing the reliability and durability of such installations. All this makes it possible to qualitatively assess the trend in the development of instabilities and defects, which can eventually lead to the destruction of the solid-state working chamber of various power plants. The availability of a reliable database of their characteristics and operating modes of the working substance in real conditions with numerical parameters should allow, within the framework of the considered concepts, to fulfil predictive modeling and prediction of the durability of safe and stable operation of such devices and control their modes, taking into account appropriate metrological support.

Keywords: dynamic processes, fractal models, surface defects and fractured structures, controlled processes, reliability of operation of thermal power plants

For citation: Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelian M. M., Arakelyan S. M. (2024) Dynamic Processes of Development Jointing of a Fractal Type: Models for a Solid-State Material of the Chamber in a Power Facility during its Operation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (2), 152–172. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-152-172> (in Russian)

Введение

Исследование закономерностей формирования и развития дефектов в ответственных металлических деталях и элементах машиностроения, включая энергоустановки и тепловые машины разного класса, представляет значительный интерес в аспекте надежности и долговечности их работы и предотвращения разрушительных процессов [1, 2]. Поскольку режимы функционирования таких систем с разным фазовым составом рабочего тела (газожидкостным, парогазовым и паротурбинным, реактивным и др.) обычно реализуются в условиях сильных вибраций и с комплексом сложных физико-химических превращений при нестационарных тепловых яв-

лениях с динамическими режимами с разными циклами и вибрациями, как это происходит, например, в рекуператорах разного назначения [3–5], то динамика развития неустойчивостей определенного типа в самом конструкционном материале энергетического оборудования требует детального рассмотрения и анализа в каждом конкретном случае при соответствующем метрологическом обеспечении для предотвращения выхода конструкции из строя.

Однако зарождение таких неоднородностей в металлах начинается в локализованных областях с пространственными масштабами в микро- и нанодиапазоне (ср.: [6–9]). То, какое топологическое развитие они получают в дальнейшем и за какое время, и есть предмет изучения и прогноза. Это требует проведения моделирования на соответствующих физических принципах таких динамических процессов образования дефектов с циклически повторяющимися напряжениями и движениями с определенной возможностью управления их развитием в аспекте как распространения на макромасштабы, так и остановки и даже восстановления – «заживления» (ср.: [10–12]). Подобные эффекты, приводящие к повреждениям исследуемого материала, обычно происходят от зарождения точечных дефектов с дальнейшим образованием трещиноватых структур разной топологии – как поверхностных, находящихся в контакте с рабочим веществом, так и объемных, связанных в том числе с усталостным разрушением материалов, в частности с корродирующим воздействием солевых растворов на металлические элементы установки в рассольного типа теплообмене [13, 14].

В [15, 16] акцент сделан на аналогии этих процессов с моделями лазерного воздействия на поверхность материалов с образованием сложных конфигураций фрактального типа открытого трещиноватого класса и замкнутых кластерных структур на твердой поверхности.

В настоящей фрагментарно обзорной работе предложен ряд достаточно универсальных моделей динамики развития подобных дефектов и протяженных неоднородностей в аспекте их предсказательного моделирования.

Детальное исследование мест возникновения, их распределения, размеров и динамики распространения на определенной поверхности рабочей камеры разрушительных процессов, связанных с режимами и циклическими работами теплоэнергетических установок, представляет ключевую проблему для корректной оценки и предупреждения причин нарушения устойчивости при их эксплуатации [17, 18]. Если мы говорим об исключительной роли рабочего вещества, возникает поразительный феномен в этой концепции: почему и при каких условиях газожидкостная смесь единовременно, в рабочих режимах, нештатно сосредоточивается на отдельном (даже небольшом) участке на поверхности [19, 20]?

Однако в практической деятельности существует большое количество других факторов, которые могут повлиять на процесс такой локализации, приводящих к различным динамическим явлениям. На основе этих утверждений можно сделать вывод о том, что проблема, связанная с режимами

работы, должна рассматриваться на более комплексном уровне и, в частности, с привлечением фундаментальных процессов нелинейной динамики [21, 22].

При этом определенный и часто неконтролируемый поток газожидкостной фазы на разного типа неоднородностях модифицируется и протекает также и по каналам 3D-сети имеющихся трещин разного масштаба в массиве камеры с влиянием ряда факторов. Анализ этих факторов, а также их роль в процессе реконструкции трехмерной сети трещин в аспекте реструктурирования транзитных путей для рабочего вещества при возникновении критических явлений позволяет понять реализующиеся состояния в рабочей камере [23, 24].

Используемые нами материалы и методы исследования связаны с представлением трехмерной сетевой 3D-системы твердотельной камеры, которая подвергается постоянным воздействиям. Это происходит по той причине, что на нее оказывают влияние многочисленные как изолированные и локализованные, так и комплексные явления взаимодействием по разным характеристикам (ср.: [15, 16]).

Неотъемлемое условие такого взаимодействия связано с наличием различных дефектов (трещин), которые сформировались на поверхности и в объеме камеры. Именно эти рассматриваемые объекты и устанавливают общий реализующийся режим работы.

Кроме того, колебания давления в камерах происходят по нескольким причинам, одной из которых является нестационарность процессов. В результате этих явлений циклически выделяется энергия, которая может разрушать твердую основу, не говоря уже о перестройке возникающей 3D-сети трещин и дефектов в ней, и оставляет после себя свободные незаполненные рабочим веществом пространства. Все это оказывает влияние, в том числе на удаленных временных интервалах, на перепад давления в камере, и создает новую структуру трехмерной сети и гидродинамических явлений внутри нее с возможностью последующего разрушения [25–27].

Фрактальная модель 3D-трещиноватости камеры с рабочим веществом – топология дефектов внутри материала с ее выходом на поверхность камеры

Выполнено численное моделирование процесса формирования и модификации 3D-структуры трещиноватости в такой твердотельной системе, который может оказывать влияние на разрушительные процессы в камере (ср.: [15, 16, 28, 29]).

Данный механизм определяется возможностью стремительного выхода на поверхность камеры и объемных дефектов благодаря уже ранее упомянутым двум факторам – динамике изменения давления в трехмерной сети трещин и трансформации ее топологии в соответствующих пространственных локациях.

Основная задача при этом заключается в том, чтобы выявить и детально рассмотреть факторы, а также их роль в процессе такой модификации трехмерной сети неоднородностей в аспекте происходящего реструктурирования транзитных путей распространения рабочего вещества по ним, приводящих к возникновению критических состояний (рис. 1) (ср.: [30–32].

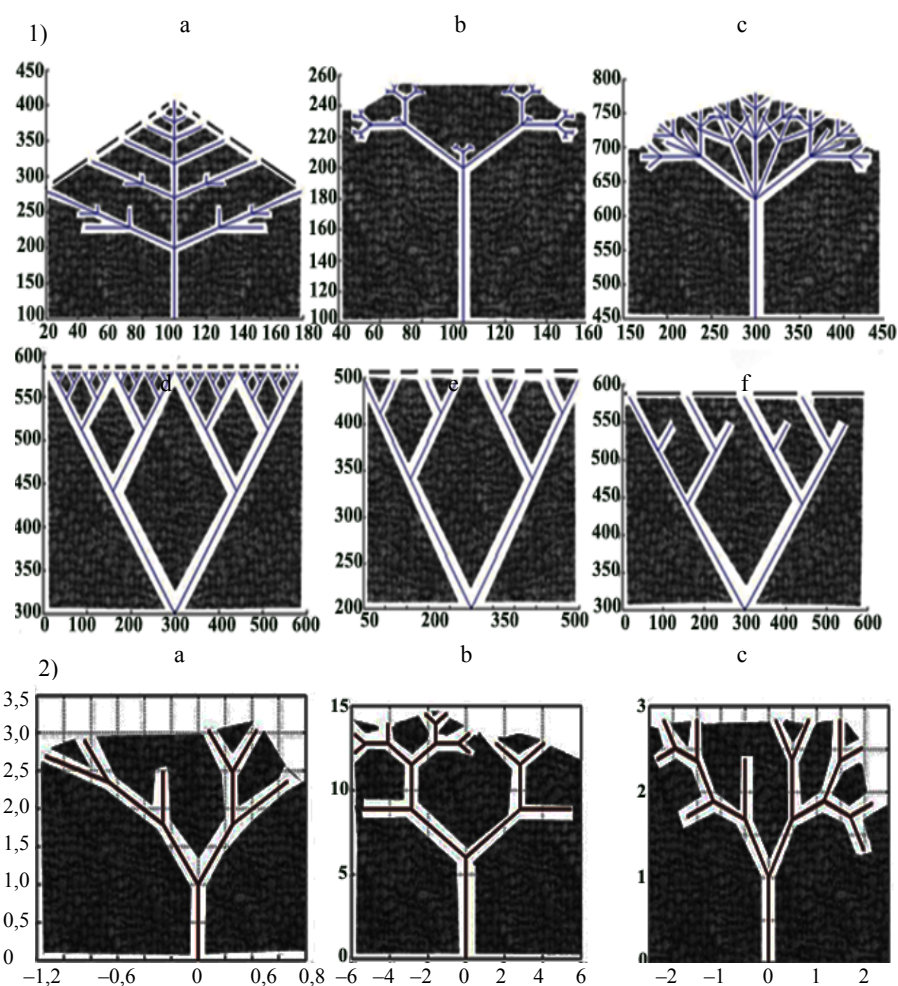


Рис. 1. Детерминированные модели «фрактальных деревьев» – графов, трещиноватости твердотельной основы рабочей камеры, по которым осуществляется транзит газожидкостной смеси (1): а – «основная ветвь»; б – «ветвь при вершине»; с – «ветвь при вершине F-образной формы»; d – насыщенный V-образный граф; е – V-образное дерево с меньшим количеством ветвей; f – дерево с левым доминированием ветвей; 2 – примеры случайных моделей в зависимости от углов формирования ветвей графа (варианты а, б, с)

Fig. 1. Deterministic models of "fractal trees" – graphs, jointings of the solid-state base of the working chamber, through which the gas-liquid mixture is transited (1): a) "main branch"; b) "branch at the top"; c) "branch at the top of an F-shape"; d) saturated V-shaped graph; e) V-shaped tree with fewer branches; f) a tree with left-dominated branches. (2) Examples of random models depending on the angles of formation of graph branches (options a, b, c)

Анализ таких данных предоставляет возможность не только вести речь об исследовании разного рода воздействий, но и сравнивать их на качественном и количественном уровне для конкретной 3D-сетевой структуры объемной трещиноватости/дефектности с выходом ее из объема на внутреннюю поверхность камеры за определенное время с использованием алгоритмов в среде языков программирования высокого уровня (рис. 2) (ср.: [15, 16, 29, 30]).

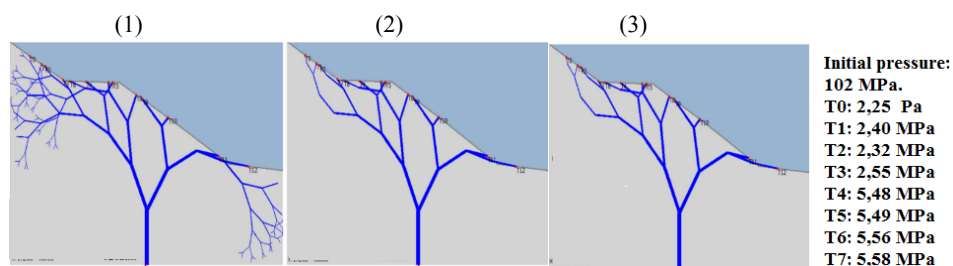


Рис. 2. Моделирование трещиноватости, реализованное в программе Midas GTS, в твердотельном объеме с выходом на поверхность камеры разного профиля (варианты 1–3; 2, 3 – с учетом разного времени формирования)

Fig. 2. Modeling of jointing, implemented in the Midas GTS program, in a solid-state volume with passage to the surface of a chamber of different profiles (1–3 options types, the last two ones – taking into account different terms of formation)

Используемый нами программный комплекс Midas GTS выполняет следующие функции: 1) формирует сетку новых трещин; 2) снимает напряжение с краевых ветвей графа, выходящих наружу; 3) вычисляет и фиксирует показатели давления жидкости в различных объемных зонах интерфейсной карты, в том числе и на ее выходе [28–32].

Дифференциальная диагностика отмеченных факторов, оказывающих первостепенное воздействие на формирование и распространение неустойчивых процессов и, в частности, их корреляция и взаимодействие между собой, является основой в сложноорганизованной процедуре прогнозирования, которая может определить локальную область зарождения критических явлений, а также их координацию при распространении на определенном участке поверхности. Безусловно, эти задачи могут быть решены только тогда, когда будут выявлены и получены подробные метрологические данные об исследуемом устройстве и, в частности, о форме его внутренней поверхности, структуре газо- и гидросистемы в целом и ее резервуаров, объеме проходящей газожидкостной смеси, а также о мощности и частоте возникновения различных режимов работы. Это позволит в оперативном порядке отслеживать ситуацию и составлять прогноз о характеристиках зарождающихся неоднородностей в условиях функционирующих процессов, влияющих на развитие критических явлений, а в итоге и сформировать комплекс мероприятий по обеспечению безопасности работы устройства в определенное время в потенциально опасных режимах его эксплуатации. Кроме того, это должно позволить смоделировать процесс

развития возможной катастрофы в динамике в соответствии и по аналогии с функционально разными газовыми и гидравлическими схемами работы теплоэнергетической установки.

Предсказать точное время наступления того или иного катастрофического события практически невозможно. Это происходит по причине того, что невозможно иметь исчерпывающую базу данных в реальном масштабе времени при наличии огромного количества факторов, которые при непрерывном взаимодействии друг с другом, а также с естественными и наведенными характеристиками оказывают стохастическое динамическое нелинейное влияние на зарождение рассматриваемого критического процесса. Проблема также заключается в том, что ни один программный комплекс ситуационного моделирования не может этот процесс рассчитать полноценно для реализации программно-аналитического управления. Но такой прогноз с вероятностью с определенным весом по складывающимся обстоятельствам вполне реален и представляет значительный интерес. Наш опыт позволил это делать с использованием нейросетевого подхода как элемента систем искусственного интеллекта, но с соответствующей полноценной процедурой их обучения и настройки [7, 31].

Однако если мы говорим о временном интервале развития события, то эта задача становится более корректной и определенной в условиях значимой и выявленной корреляционной зависимости, например между режимами работы и требуемой мощностью при различных нагрузках в энергетической сети. По результатам такого анализа данная корреляция может проявляться с задержкой в течение некоторого времени после наступления нештатной ситуации. Это происходит, например, под действием импульсного процесса высокого давления в рабочей камере и приводит к долговременным перегрузкам в работе энергетического устройства.

В рамках данного подхода можно провести аналогию с хорошо известными пневмо- и газогидравлическими системами, для которых разработаны детальные математические модели управления газовыми и гидрологическими режимами в требуемых направлениях с учетом необходимого метрологического контроля [32, 33].

Систематическое рассмотрение данной проблематики требует знания полноценной информационной картины в динамике, наряду с метрологическими условиями, в первую очередь о таких процессах, как количественный уровень газожидкостной смеси в резервуарах (на основе мониторинга с помощью анализа ее состояния, например датчиками в удаленном доступе), а также о структуре 3D-сети дефектов/трещин в объеме, их поверхностных особенностях. Данные о вариации давлений в камере до и после выбранных по влиянию изменяющихся режимов (в том числе в рамках определенного технологического процесса), могут определять характеристики самого произошедшего нештатного события (ср.: [34, 35]).

Уникальное явление при этих процессах может быть связано с процессами реконструкции твердой структуры, подверженной трещиноватости,

в самопроизвольном формате, но при динамически развивающихся процессах.

Действительно, если смотреть во временной проекции на рис. 1, 2 как берущий свое начало из источника напряжения в объеме материала (исходные точки на нижней границе рисунков), то в динамике их трансформация может происходить по разным направлениям, в том числе и без выхода на рабочую поверхность камеры (тупиковые/скрытые ветви в объеме твердого тела), которая в этом случае будет становится бездефектной. При этом данный процесс может быть управляемым с использованием разных метрологических методов для реализации требуемого воздействия с помощью соответствующих управляющих параметров.

Такой эффект хорошо известен (например, его моделирование в [11]) и недавно наблюдался экспериментально в наноструктурированных металлических поверхностях [10].

Подобное самопроизвольное «залечивание» трещин происходит при локально возникающих внутренних давлениях на границах неоднородностей, особенно в гранулированных структурах, при их случайной миграции. Эта своего рода холодная сварка особенно сильно проявляется на кончиках фрактальных структур и является отражением трещиноватой структуры как открытой системы с происходящими динамическими процессами геометрической перестройки в различные топологические конфигурации. Именно их тип, показанный на рис. 1–2, и подвержен таким процессам (ср. с аналогичными изображениями в [10]). Необходимые условия для этого модельно обсуждаются в [11] для нанокристаллических металлов с учетом неоднородностей/шероховатостей гранулированной структуры и при развитии разного типа дислокаций. Мы этот динамический процесс рассмотрим ниже.

1. Модель клеточного автомата для анализа распространения протяженных неоднородностей от локализованного источника напряжений

Для распространения определенной конфигурации трещиноватости на поверхности твердотельной структуры рабочей камеры теплоэнергетической установки воспользуемся хорошо известной методологией клеточного автомата [36–39], которую использовали в [15, 16].

Результаты, полученные нами в рамках данного алгоритма, представлены на рис. 3–6 в относительных единицах для предмета рассмотрения в настоящей статье без детального описания, но с выявленной динамикой распространения пространственно-распределенной неоднородности и с соответствующими начальными условиями (будем эти объекты неоднородности называть для краткости признаком).

Предложенная модель позволяет задавать следующие параметры: площадь расчетной области, которая составляет количество агентов (N); величины β и γ – вероятности принятия или непринятия признака, соответ-

ственно; T – время. Возможно также задание различных начальных состояний модели, которое реализуется через определение начальной точки, – источника и/или границ – для распространения признака по поверхности объекта (участка образца).

На рис. 3 представлены варианты, когда распространение признака начинается из углов расчетной области, что соответствует возникновению дефекта на краях поверхности участка образца и/или на граничных контактах с другими областями поверхности, где уже существует данный признак (дефект/неоднородность). В этом случае наблюдается небольшая скорость распространения признака по поверхности объекта.

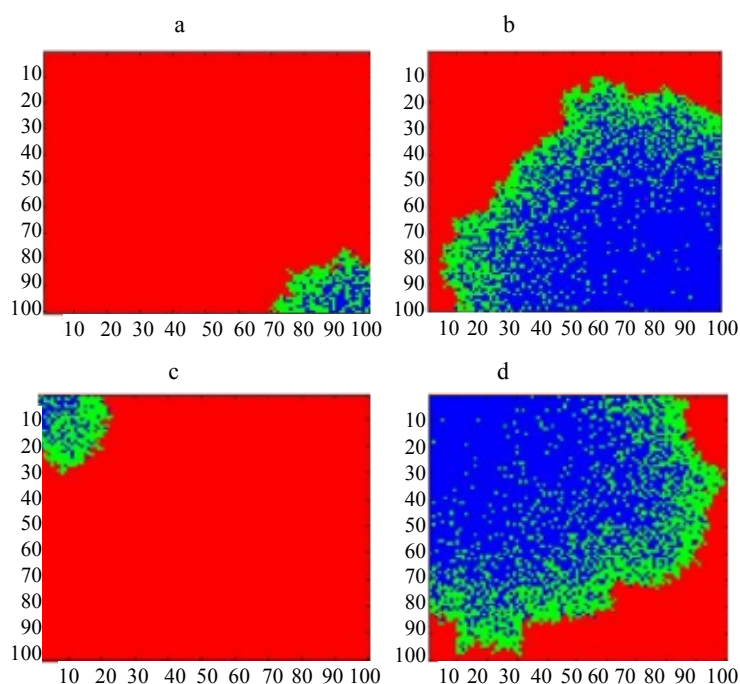


Рис. 3. Решение модели распространения признака методом клеточного автомата для: $\beta = 0,029$, $\gamma = 0,01$, $N = 10000$; а – $T = 100$ о. е., нижний правый угол; б – 500 о. е., нижний правый угол; с – 100 о. е., верхний левый угол; д – 500 о. е., верхний левый угол

Fig. 3. Solution of the feature propagation model by the cellular automaton method for: $\beta = 0.029$, $\gamma = 0.01$, $N = 10000$; а – $T = 100$ relative units, lower right corner; б – 500 relative units, lower right corner; с – 100 relative units, upper left corner; д – 500 relative units, upper left corner

На рис. 4 представлены варианты, когда распространение признака начинается с одной из границ расчетной области, что соответствует контакту исследуемого участка с внешней границей к области с данным признаком. В этом случае наблюдается наибольшая скорость распространения признака по поверхности участка.

Анализируя такие разные варианты расчета распространения признака, начинающегося из углов и/или от границ расчетной области, можно пред-

положить, что они соответствуют случаям проникновения признака извне, например приток дефектов из соседних областей при контакте образца с потоком дефектов на плоскости из соседних областей, подверженных какому-то воздействию (внешнему и/или внутреннему из-за соответствующего технологического режима).

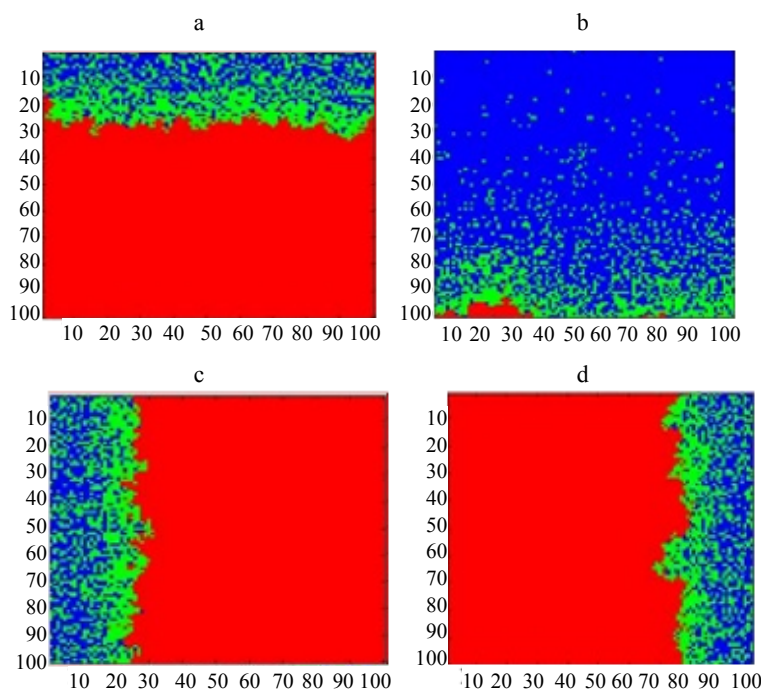


Рис. 4. Решение модели распространения признака методом клеточного автомата для: $\beta = 0,029$, $\gamma = 0,01$, $N = 10000$; а – $T = 100$ о. е., верхняя граница расчетной области; б – 500 о. е., нижняя граница; с – 100 о. е., левая граница; д – 100 о. е., правая граница

Fig. 4. Solution of the feature propagation model by the cellular automaton method for: $\beta = 0.029$, $\gamma = 0.01$, $N = 10000$; а – $T = 100$ relative units, upper boundary the computational domain; б – 500 relative units, lower boundary; с – 100 relative units, left boundary; д – 100 relative units, right boundary

Из рис. 5 можно оценить влияние начальных условий. Здесь эти начальные условия представляют собой область радиуса r , т. е. исходное количество взаимодействующих фрагментов / локальных неоднородностей на поверхности участка образца, принявших рассматриваемый признак (под воздействием каких-то разных причин). Такой подход позволяет оценить (с учетом числа начальных фрагментов на поверхности участка образца с данным признаком) относительное время T его распространения (число шагов при расчете). Таким образом, благодаря выбранным начальным условиям состояния поверхности (в условиях работы установки) результирующее распределение признака имеет более сильно изрезанные границы, что требует анализа с учетом величины фрактальной размерности.

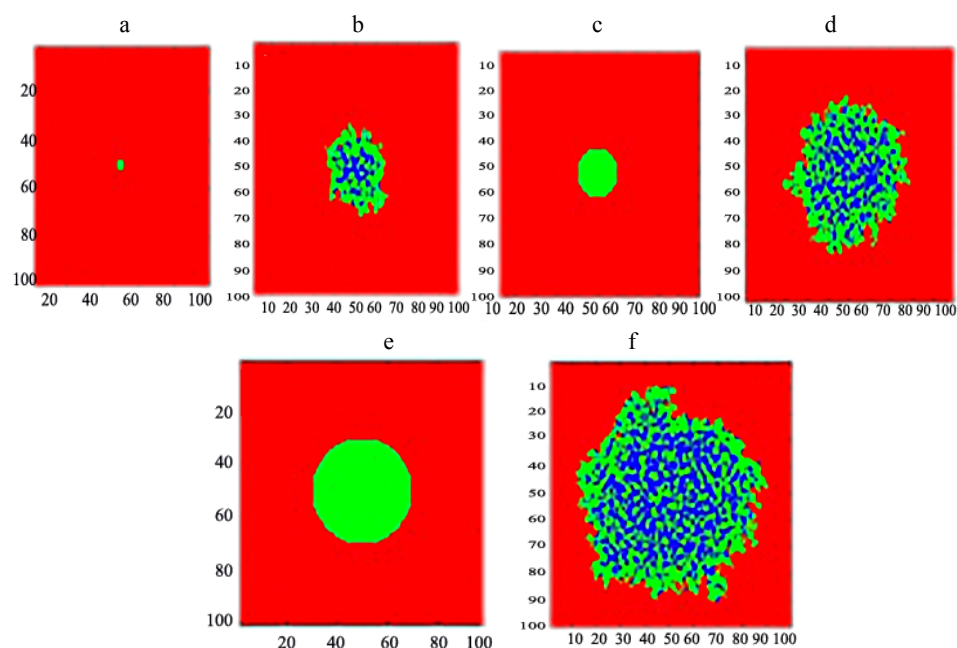


Рис. 5. Начальные условия и решение – изображение для области распространения изучаемого признака состояния: а – начальные условия $r = 2$ о. е., $T = 4$ о. е.; б – соответствующее решение, но для $T = 100$ о. е.; с – начальные условия $r = 10$ о. е., $T = 4$ о. е.; д – соответствующее решение, но для $T = 100$ о. е.; е – начальные условия $r = 20$; $T = 4$; ф – соответствующее решение, но для $T = 100$ о. е.

Fig. 5. Initial conditions and solution – image for the distribution area of the studied state sign: а – initial conditions $r = 2$ in rel. units, $T = 4$ in rel. units; б – the corresponding solution but for $T = 100$; с – initial conditions $r = 10$, $T = 4$; д – the corresponding solution, but for $T = 100$; е – initial conditions $r = 20$; $T = 4$; ф – the corresponding solution, but for $T = 100$

Сравнивая площади фигур, задающих начальные условия и соответствующие результаты расчета, становится возможным провести оценку роста/развития, например, по поверхности признака/состояния – определенного дефекта. Гистограмма такого процесса представлена на рис. 6.

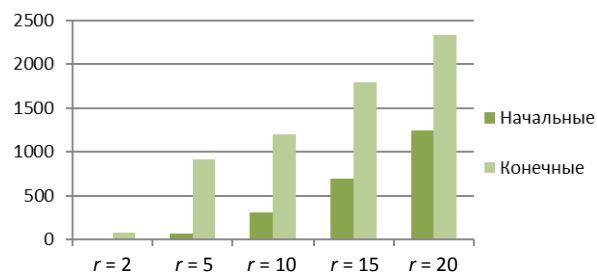


Рис. 6. Индекс роста состояния/признака по поверхности образца (в зависимости от значения параметра r – зоны образовавшегося дефекта из-за воздействия) во времени через T шагов (в о. е.)

Fig. 6. Index of growth of a state/feature on the surface of the sample (depending on the value of the parameter r – the zone of the defect formed due to the impact) in time through T steps (in relative units)

Из приведенных рисунков видна зависимость изменения характера картины для развития признака/состояния – неоднородностей от размера начальных областей – источников дефектов, возникших по разным причинам, в том числе и находящихся под внешним воздействием – распространение признака для фиксированного (в о. е.) времени T . Например, наибольшая скорость распространения критического состояния наблюдается при внесении признака в систему извне через протяженную границу с большим числом дефектов – воздействием. Предложенный подход позволяет в первом приближении качественно оценить и проиллюстрировать характер процессов при поверхностных модификациях структур и/или процессах разрушения для экстремального воздействия в разных геометриях и схемах. Основываясь на предложенных моделях, можно оценить относительные темпы роста, например, различных гидродинамических дефектов на поверхности образца.

Таким образом, нами предложен алгоритм для прогнозирования развития новых физических состояний на поверхности изделий, находящихся под внешним воздействием, при соответствующем выборе ключевых управляющих параметров для рассматриваемых процессов. Проблема состоит в переходе от относительных единиц для этих параметров к конкретным их численным значениям в реально используемой схеме и выбранных рабочих условиях. Это и есть центральный пункт при использовании данного подхода в конкретных приложениях по управляемой модификации поверхности материалов и разработке соответствующих практических элементов.

Влияние деформационных дислокаций на параметры возникающей трещиноватости

В связи с внешним воздействием (в частности, из-за технических рабочих вибраций процессов разной интенсивности) на 3D-трещиноватость материала энергетической установки следует хотя бы кратко рассмотреть ее деформационную модификацию по механизму роста плотности дислокаций в процессе деформирования на основе микроподхода в условиях накопления деформации [19–22, 40–42]. Именно эти процессы сильно влияют на степень воздействия газожидкостного рабочего вещества на прочность камеры в процессе ее рабочих циклов. При этом присутствие различных неоднородностей и полостей внутри камеры может явиться дополнительным источником дислокаций и способствовать как разрушению ее материала, так и упрочнению.

Однако в условиях шероховатости поверхности трещин в точках их контакта друг с другом возникают экстремальные локальные напряжения/давления, на несколько порядков превышающие напряжения внутри однородного материала. Это определяет пиковые режимы разгрузки, приводящие к экстремальным условиям для таких динамических параметров трещиноватости. Данные центры генерации дислокаций обусловлены наличием внешнего упругого воздействия (в частности, из-за определен-

ных режимов эксплуатации) и могут кардинально изменять режимы баланса рабочего вещества в 3D-структуре энергетической установки.

Приведем только несколько из полученных нами качественных демонстрационных численных результатов для генезиса дислокаций в рамках модели нелинейной динамической системы с уравнением синус-Гордона с учетом влияния барьера/границы Пайерса [21, 23, 43–45]. Речь будет идти только о демонстрационных зависимостях без конкретных количественных реальных численных данных, которые должны уточняться для каждого конкретного состава и структуры тепловой машины.

В рамках одномерной модели дислокации (в координатах как пространственных x , так и временных t) Френкеля – Конторовой движение дислокаций описывается уравнением синус-Гордона [41, 43, 44]

$$\varphi_{tt} - c_0^2 \varphi_{xx} + \omega_0^2 \sin \varphi = 0,$$

где c_0 – скорость звука (предельная скорость в упругой среде); ω_0 – характерная частота внешнего вибровоздействия; φ – отклонение дефекта в материале от положения равновесия в угловых единицах, вторые производные для φ по координатам x и по времени t обозначены двойными индексами (xx) и (tt) соответственно. Моделирование проведено в относительных единицах в окрестности дислокации для самой дислокации (ε) и для возникающих напряжений (s).

Граничные условия заключаются в том, что область, в которой распространяется дислокация, считается открытой на обоих концах,

$$\text{т. е. } \left[\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right]_{x=0} = \left[\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right]_{x=l} = 0, \text{ где } l - \text{безразмерная длина рассматриваемой}$$

области, которую мы считаем для простоты в виде плоского слоя.

Полученные численные решения выписанного уравнения в графическом виде представлены на рис. 7 для отмеченных выбранных численных параметров (в у. е. указаны на рисунках).

Из рис. 7 видно, что поле деформаций является осциллирующим и уменьшается при удалении от линии дислокации. Поле напряжений не имеет решений в данном приближении вблизи ядра дислокации (ср. с: [43, 44]).

Численный эксперимент для движения дислокаций и их взаимодействия в некотором интервале исследуемых скоростей провели для относительно малых скоростей (на практике $\sim 10^{-3}$ см/с) (рис. 8). Мы считаем, что при взаимодействии дислокаций одна из них заменяется ее упругим полем, и рассматривается воздействие этого поля на соседнюю дислокацию. Дислокация, которая заменяется созданным ею полем, находится в начальный момент в начале координат ($x = 0$), а изучается воздействие этой дислокации на единицу длины второй дислокации, имеющей координаты x, y . В данной модели предполагается, что дислокации совместно двигаются в одной плоскости в среде с одинаковыми скоростями (дислокации считаются одного знака, между которыми действуют силы отталкивания).

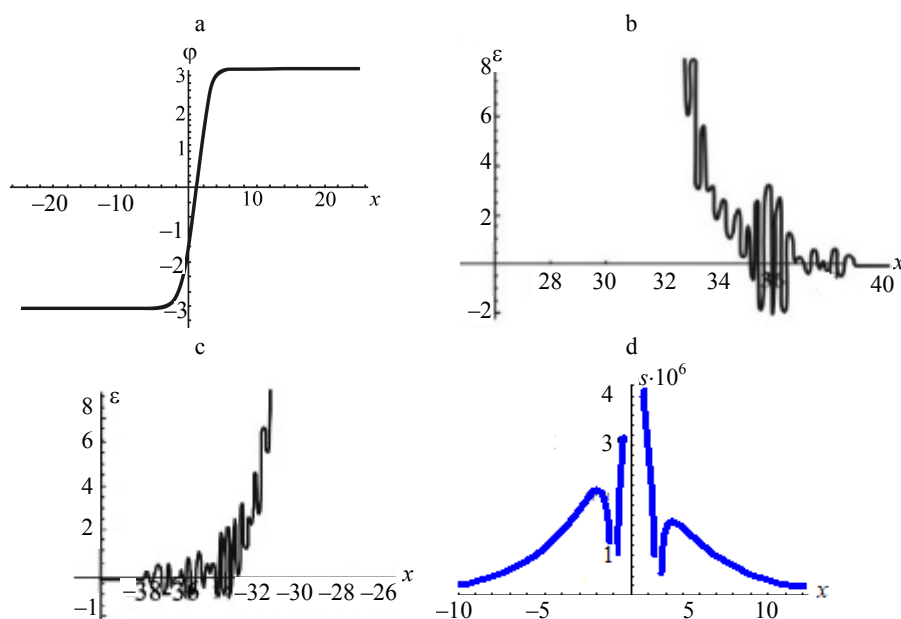


Рис. 7. Зависимости деформаций ε (b, c) и напряжения s (d) от координаты x в окрестности дислокации ϕ (a)

Fig. 7. Dependences of strain ε (b, c) and stress s (d) on the x coordinate in the vicinity of dislocation ϕ (a)

Анализ показывает, что при увеличении скорости движения взаимодействия между дислокациями ослабевает. Это видно при сравнении рис. 8, 9.

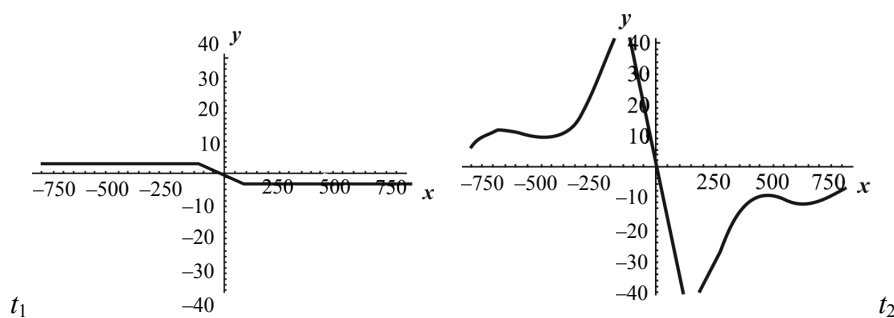


Рис. 8. Поле смещений дислокации по оси y (малые скорости $\sim 10^{-3}$ см/с), находящейся под воздействием соседней дислокации, для последовательных двух моментов времени $t_2 > t_1$

Fig. 8. Field of displacements of a dislocation along the y -axis (low velocities $\sim 10^{-3}$ cm/s), under the impact of a neighboring dislocation, for two successive moments of time $t_2 > t_1$

Действительно, как видно из рис. 8, под действием поля соседней дислокации поле данной дислокации искажается уже в течение небольшого интервала времени (в о. е.), то есть взаимодействие между дислокациями существенное.

Однако из дальнейшего численного эксперимента следует, что при увеличении скорости (на практике $\sim 10^5$ см/с) взаимодействие между дислокациями ослабляется (рис. 9).

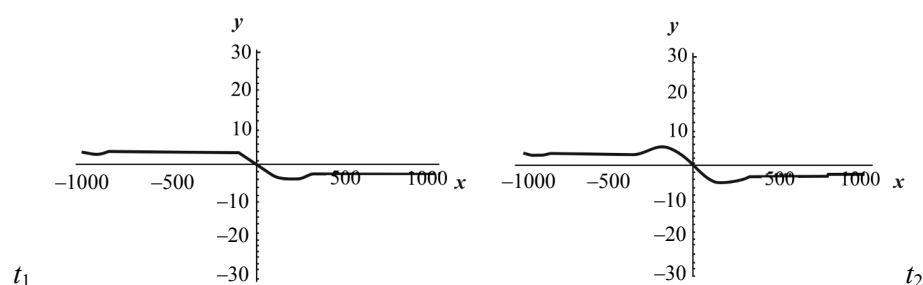


Рис. 9. Поле смещений дислокации, находящейся под воздействием соседней дислокации (что и на рис. 8), для тех же моментов времени, но для больших скоростей $\sim 10^5$ см/с

Fig. 9. The displacement field of a dislocation under the impact of a neighboring dislocation (as is as in Fig. 8), for the same moments of time, but for high velocities $\sim 10^5$ cm/s

Тем не менее, как видно из рис. 9, через тот же интервал времени, что и представленный на рис. 8, поле смещений данной дислокации почти не искажается.

Далее, с учетом воздействия внешнего упругого поля E (в нашем случае – вибрации) существует некоторое его критическое значение разрыва материала E_c . Но для разных значений E при $E \leq E_c$ в системе происходит самоорганизация: вместо одной быстрой дислокации образуется ряд следующих друг за другом медленных дислокаций, т. е. их размножение (рис. 10а, б). Подобные центры генерации дислокаций под действием внешних упругих сил могут кардинально менять стабильно существующую 3D-трещиноватость твердотельного материала, а значит, ее проницаемость для рабочего вещества.

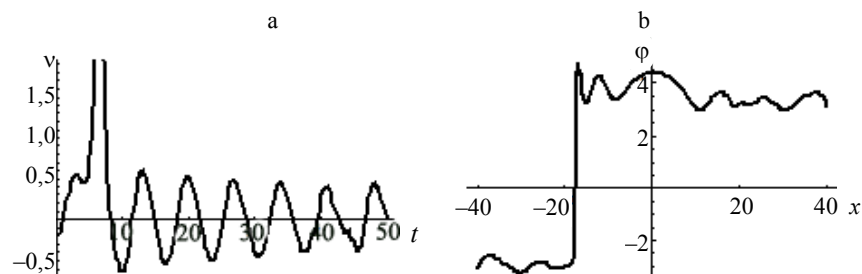


Рис. 10. Зависимость скорости дислокаций v от времени t (а); рождение медленных дислокаций (б), где ϕ – возникающие дислокации (все – в о. е.)

Fig. 10. (a) Dependence of dislocation velocity v on time t ; (b); the nucleation of slow dislocations, where ϕ are the emerging dislocations. (Everything is given in relative units)

Как видно из рис. 10а, скорость первой дислокации намного превышает скорости вновь родившихся (последующие цуги); рис. 10б – колебательный режим для состояния дислокации ϕ (ср. с рис. 7а).

Отметим также, что при наличии исходных неоднородностей в массиве рабочей камеры число рождающихся дислокаций и их плотности растут, а скорости движения уменьшаются. Также могут возникать эффекты накопления деформации; меняется и специфика скольжения дислокации.

Рассмотренные режимы генезиса дислокаций для такого типа разгрузки (мы их привели без деталей расчета) могут приводить к сдвигу по отдельной дислокации вещества камеры и, вероятно, к образованию крупномасштабных дефектов. При этом скорости движения газожидкостного рабочего вещества по таким контактам с малопроницаемыми слоями в объеме устройства во много раз превышают скорости движения рабочего вещества в обычных условиях эксплуатации. Это в итоге и приводит к особенностям надежности работы энергетической установки.

Кроме того, аккумуляционные возможности газожидкостных масс внутри таких устройств с образовавшимися из-за дислокаций коллекторами резко изменяются, и их прорыв наружу уже становится не связанным с общими зависимостями, характерными для рабочих режимов в стабильных состояниях; здесь происходит отсечение нормального процесса функционирования. Установление и анализ прогнозируемых и традиционных корреляций между разными факторами становятся затруднительными, поскольку может возникать быстрый пневмо- и гидродинамический ударный процесс. Это определяет продолжительность надежной работы устройства. Однако для практических целей требуются натурные испытания и измерения на тестовых экспериментальных прототипах изделий, которые в рамках предсказательного моделирования могут быть обобщены на реальные условия рассматриваемых режимов работы тепловых энергоустановок.

Проведенный анализ позволяет выявить базовые тенденции и тренды развития трещиноватости разного типа и других разных неоднородностей в технических изделиях теплоэнергетики.

ВЫВОДЫ

1. Проанализирована фрактальная модель трещиноватости камеры с рабочим веществом – возникновение определенной топологии внутри материала с выходом ее на поверхность камеры.

2. В рамках модели клеточного автомата для распространения протяженных неоднородностей от локализованного источника напряжений приведены результаты по распространению в 2D-приближении картины неоднородностей при разных режимах.

3. Проанализированы модификации и развитие 3D-трещиновой структуры в материале с использованием соответствующих аналитических соотношений, включая развитие деформационных дислокаций.

4. Это позволяет оценивать тенденции в развитии неустойчивостей и дефектов, которые могут приводить к разрушению твердотельной рабочей камеры энергетических установок разного класса. Наличие достоверной базы данных по их характеристикам и режимам работы рабочего вещества в реальных условиях с численными параметрами должно позволить в рамках рассмотренных представлений осуществлять предсказательное моделирование и прогноз долговечности безопасной и устойчивой работы подобных устройств и управлять их режимами с учетом соответствующего метрологического обеспечения и мониторинга развивающихся динамических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стойкость унифицированного модульного чугунного рекуператора нагревательных печей высокотемпературных теплотехнологий машиностроительных и автотракторных

- предприятий / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 3. С. 48–54.
2. Рыжова, Т. В. Идентификация математической модели процессов тепло- и массопереноса в псевдооживленном слое по результатам эксперимента / Т. В. Рыжова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1999. № 6. С. 75–78.
 3. Гидродинамическое сопротивление унифицированного модульного рекуператора нагревательных и термических печей заготовительного и механосборочного комплексов машиностроительных и автотракторных заводов / А. П. Несенчук [и др.] // Вестник Белорусского национального технического университета. 2007. № 4. С. 20–23.
 4. К расчету унифицированного модульного рекуператора (модули М-I и М-II) для нагревательных и термических печей заготовительного и механосборочного производств машиностроительных и автотракторных заводов Республики Беларусь / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2007. № 4. С. 47–51.
 5. Анализ эффективности использования различных типов рекуператоров в нагревательных печах металлургического производства / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 5. С. 46–53.
 6. Абляция тонких пленок молибдена с поверхности прозрачных подложек лазерными импульсами фемтосекундной длительности / А. Е. Гулевич [и др.]. Минск: Бел. наука, 2012. С. 339–340.
 7. Введение в фемтонаноплатонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов: учебное пособие / С. М. Аракелян [и др.]; под общ. ред. С. М. Аракеяна. М.: Логос, 2015. 744 с.
 8. Несенчук, А. П. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки: в 2 ч. / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский; под общ. ред. А. П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2008. Ч. 1. 525 с.
 9. Несенчук, А. П. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки: в 2 ч. / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский / под общ. ред. А. П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2008. Ч. 2. 530 с.
 10. Autonomous healing of fatigue cracks via cold welding / C. Barr [et al.] // Nature. 2023. Vol. 620. P. 552–556. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06223-0>.
 11. Xu, G. Crack Healing in Nanocrystalline Palladium / G. Xu, M. J. Demkowicz // Extreme Mechanics Letters. 2016. Vol. 8. P. 208–212. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2016.03.011>; van Dijk, N. Self-Healing Phenomena in Metals / N. van Dijk, S. van der Zwaag // Adv. Mater. Interfaces. 2018. Vol. 5, No 17. P. 1800226. <https://doi.org/10.1002/admi.201800226>.
 12. Suresh, S. Oxide-Induced Crack Closure: An Explanation for Near-Threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior / S. Suresh, G. F. Zamiski, D. R. O. Ritchie // Metall Trans A. 1981. Vol. 12. P. 1435–1443. <https://doi.org/10.1007/BF02643688>.
 13. К выбору способа оценки коэффициента теплоотдачи к вертикальному ребру рассольного теплообменника / Ю. А. Малевич [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1998. № 6. С. 69–71.
 14. Измерение скорости хладоносителя в межтрубном пространстве шахматных пучков рассольных теплообменников / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1999. № 1. С. 58–61.
 15. Рыжова, Т. В. Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок. Ч. 1 / Т. В. Рыжова, Д. Н. Бухаров, С. М. Аракелян // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 3. С. 231–242. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-231-243>.
 16. Рыжова, Т. В. Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок. Ч. 2 / Т. В. Рыжова, Д. Н. Бухаров, С. М. Аракелян // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 4. С. 333–341. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-333-341>.
 17. Определение неравномерности прогрева контрольного сечения массивной штанги при нагреве в камерной печи кузнечного отделения заготовительного производства машиностроительного завода / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2003. № 2. С. 52–55.
 18. Численный анализ характеристик процесса тепловой обработки многослойных композитных изделий в теплотехнологических установках / В. Н. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. № 1. С. 52–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-52-66>.
 19. Экспериментальная оценка теплоотдачи в ограниченном пространстве при работе вихревого теплогенератора в системе теплоснабжения / А. П. Несенчук [и др.] // Наука –

- образованию, производству, экономике: материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: Б. М. Хрусталев, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. Минск: БНТУ, 2012. Т. 1. С. 109–110.
20. Экспериментальное изучение скорости десорбции при импульсном нагреве микросферической частицы цеолита / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2000. № 4. С. 85–89.
21. Griffith, A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids / A. A. Griffith // Philosophical Transactions of the Royal Society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1921. Vol. 221. P. 163–198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>.
22. Температурные графики нагрева эвтектических сталей / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 6. С. 62–65.
23. О целесообразности использования вихревого теплогенератора при реализации теплоснабжения объектов, работающих в условиях чрезвычайных ситуаций / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 1. С. 45–51.
24. Уточненная численная модель тепло- и массопереноса в термодиссоциированном гравитационном потоке системы очистки искусственных горючих газов от диоксида углерода / А. П. Несенчук [и др.] // Литье и металлургия. 2001. № 3. С. 83–85.
25. Энергоэкологический анализ сжигания горючих газов в нагревательных печах металлургических и машиностроительных заводов / Б. С. Сорока [и др.] // ИФЖ. 2001. Т. 74, № 4. С. 84–88.
26. Расчет и конструирование современных газопламенных установок для нагрева и термообработки металла / В. И. Тимошпольский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 4. С. 34–43.
27. Эффективность использования топлива в идеальном цикле ГТУ с изобарным подводом теплоты / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 2. С. 43–48.
28. Нанооптика тонкопленочных лазерно-индуцированных топологических структур на поверхности твердого тела: фундаментальные явления и их приложения / С. Н. Багаев [и др.] // Известия РАН. Сер. физическая. 2020. Т. 84, № 12. С. 1682–1695. <https://doi.org/10.31857/s0367676520120066>.
29. Formation of Fractal Dendrites by Laser-Induced Melting of Aluminum Alloys / A. Kucherik [et al.] // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, № 4. P. 1043. <https://doi.org/10.3390/nano11041043>.
30. Динамические и квантовые эффекты в кластерных низкоразмерных многослойных твердотельных наноструктурах для элементной базы микро- и наноэлектроники / С. М. Аракелян [и др.] // Известия РАН. Сер. физическая. 2022. Т. 86, № 4. С. 834–840. <https://doi.org/10.31857/S0367676522060047>.
31. Самарский, А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. М.: URSS, 2020. 784 с.
32. Гликман, Б. Ф. Математические модели пневмогидравлических систем / Б. Ф. Гликман. М.: Наука, 1986. 368 с.
33. Беланков, А. Б. Применение клеточных автоматов для моделирования микроструктуры материала при кристаллизации / А. Б. Беланков, В. Ю. Столбов // Сиб. журн. индустр. матем. 2005. Т. 8, № 2. С. 12–19.
34. К выбору источника теплоснабжения мобильного строительного сооружения / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 2. С. 67–73.
35. Энерготехнологическая установка на базе нагревательной печи прокатного стана с опцией производства / В. А. Седнин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. № 2. С. 127–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-127-142>.
36. Zaitsev, D. A. A Generalized Neighborhood for Cellular Automata / D. A. Zaitsev // Theoretical Computer Science. 2017. Vol. 666. P. 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.11.002>.
37. Goldenberga, J. Using Cellular Automata Modeling of the Emergence of Innovations / J. Goldenberga, S. Efronib // Technological Forecasting & Social Change. 2001. № 68. P. 293–308.
38. Богданова, Е. А. Имитационное моделирование как инструмент принятия решений [Электронный ресурс] / Е. А. Богданова, А. А. Шерстянкина // Novaum. 2017. № 6. Режим доступа: <http://novaum.ru/public/p181>.
39. Козлов, Г. В. Кластерная модель аморфного состояния полимеров / Г. В. Козлов, В. У. Новиков // УФН. 2001. Т. 171, № 7. С. 717–764. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0171.200107b.0717>.
40. Scott, A. Nonlinear Science: Emergence and Dynamics of Coherent Structures / A. Scott. New York: Oxford University Press, 2003. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198528524.001.0001>.

41. Mandelbrot, B. B. *Fractals and Chaos: The Mandelbrot Set and Beyond* / B. B. Mandelbrot. New York: Springer-Verlag, 2004. 308 p.
42. Связь поверхностной самодиффузии и подвижности пузырей в твердом теле: теория и атомистическое моделирование / А. С. Антропов [и др.] // ЖЭТФ. 2019. Т. 156, вып. 1. С. 125–134. 10.1134/S0044451019070137.
43. Арнольд, В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд. 3-е изд., доп. М.: Наука, 1990. 128 с.
44. Чернышев, С. Н. Трещины горных пород / С. Н. Чернышев. М.: Наука, 1983. 293 с.
45. Мартинсон, Л. К. Дифференциальные уравнения математической физики / Л. К. Мартинсон, Ю. И. Малов; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. 4-е изд., стер. М.: МГТУ имени Баумана, 2011. 369 с. (Сер. Математика в техническом университете; Вып. XII).

Поступила 21.10.2023 Подписана в печать 26.12.2023 Опубликовано онлайн 29.03.2024

REFERENCES

1. Nesenchouk A. P., Shidlovsky V. V., Ryzhova T. V., Shklovchik D. I., Kovalev S. S. (2010) Resistance of Cast Iron Unified Module Recuperator of Heating Furnaces with High-Temperature Thermal Technologies at Machine Building, Automotive and Tractor Enterprises. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 48–54. (in Russian).
2. Ryzhova T. V. (1999) Identification of a Mathematical Model of Heat and Mass Transfer Processes in a Fluidized Bed Based on Experimental Results. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 75–78 (in Russian).
3. Nesenchouk A. P., Mandel N. L., Shishkov V. N., Novgorodova G. S., Ryzhova T. V., Pshonik M. G., Kachar A. R. (2007) Hydrodynamic Resistance of Unified Module Recuperator of Heating and Thermal Furnaces at Blanking and Machine-Assembling Shops of Engineering and Automobile-Tractor Plants. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, (4), 20–23. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2007-0-4-20-23> (in Russian).
4. Nesenchuk A. P., Mandel N. L., Shishkov V. N., Novgorodova G. S., Ryzhova T. V., Pshonik M. G., Kachar A. R. (2007) About Calculation of Unified Module Recuperator (Module M-I and M-II) for Heating and Thermal Furnaces at Blanking and Machine Assembling Shops of Engineering, Automotive and Tractor Plants in Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 47–51 (in Russian).
5. Nesenchuk A. P., Kabishov S. M., Mandel N. L., Ryzhova T. V., Shklovchik D. I., Shidlovsky V. V. (2008) Analysis of Efficiency Pertaining to Usage of Various Types of Recuperators in Heating Furnaces of Metallurgical Industry. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 46–53 (in Russian).
6. Gulevich A. E., Kisel' V. E., Kuleshov N. V., Rudenkov A. S. (2012) *Ablation of Thin Films of Molybdenum from the Surface of Transparent substrates by femtosecond laser pulses*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 339–340 (in Russian).
7. Arakelyan S. M., Kucherik A. O., Prokoshev V. G., Rau V. G., Sergeev A. G. (2015) *Introduction to Femtonanophotonics: Fundamental Principles and Laser Methods for Controlled Production and Diagnostics of Nanostructured Materials*. Moscow, Logos Publ. 744 (in Russian).
8. Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I. (2008) *High-Temperature Thermal Technological Processes and Installations. Part 1*. Minsk, BNTU. 525 (in Russian).
9. Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I. (2008) *High-Temperature Thermal Technological Processes and Installations. Part 2*. Minsk, BNTU. 530 (in Russian).
10. Barr C. M., Duong T., Bufford D. C., Milne Z., Molkeri A., Heckman N. M., Adams D. P., Srivastava A., Hattar K., Demkowicz M. J., Boyce B. L. (2023) Autonomous Healing of Fatigue Cracks via Cold Welding. *Nature*, 620, 552–556. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06223-0>.
11. Xu G., Demkowicz M. J. (2016) Crack healing in Nanocrystalline Palladium. *Extreme Mechanics Letters*, 8, 208–212. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2016.03.011>; van Dijk, N., van der Zwaag S. (2018) Self-Healing Phenomena in Metals. *Advanced Materials Interfaces*, 5 (17), 1800226. <https://doi.org/10.1002/admi.201800226>.
12. Suresh S., Zamiski G. F., Ritchie D. R. O. (1981) Oxide-Induced Crack Closure: An Explanation for Near-Threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior. *Metallurgical Transactions A*, 12, 1435–1443. <https://doi.org/10.1007/BF02643688>.

13. Malevich Yu. A., Nesenchuk A. P., Ryzhova T. V., Mal'kevich N. G., Aidarova Z. B. (1998) Towards the Choice of a Method for Estimating the Heat Transfer Coefficient to the Vertical Fin of a Brine Heat Exchanger. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 69–71 (in Russian).
14. Nesenchuk A. P., Malevich Yu. A., Ryzhova T. V., Mal'kevich N. G., Pshonik M. G., Aidarova Z. B. (1999) Measuring the Coolant Velocity in the Inter-Tube Space of Staggered Bundles of Brine Heat Exchangers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 58–61 (in Russian).
15. Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelyan S. M. (2023) Modeling Processes of Emergence and Growth of Fractal Structures and Chamber Defects of Thermal Power Units. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (3), 231–242. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-231-243> (in Russian).
16. Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelyan S. M. (2023) Modeling Processes of Emergence and Growth of Fractal Structures and Chamber Defects of Thermal Power Units. Part 2. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (4), 333–341. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-333-341> (in Russian).
17. Nesenchuk A. P., Kopko V. M., Aidarova Z. B., Fomenko O. G., Ryzhova T. V. (2003) Determination of Uneven Heating of the Control Section of a Massive Rod when Heated in a Chamber Furnace of the Forging Department of the Procurement Production of a Mechanical Engineering Plant. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 52–55. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2003-0-2-52-55> (in Russian).
18. Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V., Ryzhova T. N. (2022) Numerical Analysis of the Characteristics of the Heat Treatment Process of Multilayer Composite Products in Heat Technology Installations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (1), 52–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-52-66> (in Russian).
19. Nesenchuk A. P., Kachar I. L., Beglyak V. V., Matrunich A. Yu. (2012) Experimental Assessment of Heat Transfer in a Confined Space during Operation of a Vortex Heat Generator in a Heat Supply System. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy Desyatoi Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science for Education, Production, Economics: Proceedings of the Tenth International Scientific and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, BNTU, 109–110 (in Russian).
20. Nesenchuk A. P., Kopko V. M., Shklovchik D. M., Ryzhova T. V., Aidarova Z. B. (2000) Experimental Study of the Desorption Rate during Pulsed Heating of a Microspherical Zeolite Particle. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 85–89 (in Russian).
21. Griffith A. A. (1921) The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 221, 163–198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>.
22. Nesenchuk A. P., Kovalev S. S., Ryzhova T. V., Matusevich A. V., Begliak V. V. (2011) Temperature Diagrams of Eutectoid Steel Heating. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 62–65 (in Russian).
23. Nesenchuk A. P., Ryzhova T. V., Kachar I. L., Shklovchik D. I., Prokopenko S. I., Begliak V. V. (2012) On Expediency of Vortex Heat Generator Usage While Realizing Heat Supply for Objects Operating in Emergency Situations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 45–51 (in Russian).
24. Nesenchuk A. P., Kopko V. M., Ryzhova T. V., Pshonik M. G. (2001) A Specified Numerical Model of Heat and Mass Transfer in Quasi-Liquid Gravitation Flow of the System of Fuel Gases Purifying From Carbon Dioxide. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, (3), 83–85. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2001-3-83-85> (in Russian).
25. Soroka B. S., Timoshpol'skii V. I., Nesenchuk A. P., Trusova I. A., Ryzhova T. V., Pshonik M. G. (2001) Energy-Environmental Analysis of Combustion of Fuel Gases in Heating Furnaces of Metallurgical and Engineering Plants. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 74 (4), 956–961. <https://doi.org/10.1023/A:1012311507655>.

26. Timoshpolsky V. I., Nesenchuk A. P., Trusova I. A., Mendelev D. V., German M. L. (2008) Calculation and Designing of Up-to-Date Gas-Flame Plants for Metal Heating and Heat Treatment. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 34–43 (in Russian).
27. Nesenchuk A. P., Begliak A. V., Ryzhova T. V., Shklovchik D. I., Begliak V. V., Abrazovsky A. A. (2013) Fuel Application Efficiency in Ideal Cycle of Gas Turbine Plant with Isobaric Heat Supply. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 43–48 (in Russian).
28. Bagayev S. N., Arakelian S. M., Kucherik A. O., Bukharov D. N., Butkovsky O. Ya. (2020) Nano-Optics of Thin-Film Laser-Induced Topological Structures on a Solid Surface: Fundamental Phenomena and Their Applications. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 84 (12), 1427–1438. <https://doi.org/10.3103/S1062873820120060>.
29. Kucherik A., Samyshkin V., Prusov E., Osipov A., Panfilov A., Arakelian S., Buharov D., Skryabin I., Kavokin A. V., Kutrovskaya S. (2021) Formation of Fractal Dendrites by Laser-Induced Melting of Aluminum Alloys. *Nanomaterials*, 11 (4), 1043. <https://doi.org/10.3390/nano11041043>.
30. Arakelian S. M., Bukharov D. N., Kucherik A. O., Khudayberganov T. A. (2022) Dynamic and Quantum Effects in Cluster Low-Dimensional Multilayer Solid-State Nanostructures for Element Bases of Micro- and Nanoelectronics. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 86 (6), 701–706. <https://doi.org/10.3103/S1062873822060041>.
31. Samarsky A. A., Vabishchevich P. N. (2020) *Computational Heat Transfer*. Moscow, URSS Publ. 784 (in Russian).
32. Glikman B. F. (1986) *Mathematical Models of Pneumohydraulic Systems*. Moscow, Nauka Publ. 368 (in Russian).
33. Belankov A. B., Stolbov V. Yu. (2005) Application of Cellular Automata for Modeling the Microstructure of a Material during Crystallization. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 8 (2), 12–19 (in Russian).
34. Nesenchuk A. P., Beglyak A. V., Ryzhova T. V., Iokova I. L., Beglyak V. V. (2014) Selection of Heat Supply Source for Mobile Building Structure. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 67–73 (in Russian).
35. Sednin V. A., Ivanchikov E. O., Kaliy V. A., Martinchuk A. Y. (2022) Energy-and-Technology Installation Based on a Rolling Mill Heating Furnace with the Option of Hydrogen Production. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 127–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-127-142> (in Russian).
36. Zaitsev D. A. (2017) A Generalized Neighborhood for Cellular Automata. *Theoretical Computer Science*, 666, 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.11.002>.
37. Goldenberg J., Efroni S. (2001) Using Cellular Automata Modeling of the Emergence of Innovations. *Technological Forecasting & Social Change*, 68 (3), 293–308.
38. Bogdanova E. A., Sherstyankina A. A. (2017) Simulation Modeling as a Decision-Making Tool. *NovaUm.ru*, (6). <http://novaum.ru/public/p181> (in Russian).
39. Kozlov G. V., Novikov V. U. (2001) Cluster Model for the Polymer Amorphous State. *Physics–Uspekhi*, 171 (7), 681–724. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0171.200107b.0717>.
40. Scott A. (2003) *Nonlinear Science: Emergence and Dynamics of Coherent Structures*. New York, Oxford University Press. 480. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198528524.001.0001>.
41. Mandelbrot B. B. (2004) *Fractals and Chaos: The Mandelbrot Set and Beyond*. New York, Springer-Verlag. 308 (in Russian).
42. Antropov A. S., Ozrin V. D., Stegailov V. V., Tarasov V. I. (2019) Relationship between Surface Self-Diffusion and Bubble Mobility in Solids: Theory and Atomistic Simulation. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 129 (1), 103–111. <https://doi.org/10.1134/S1063776119060098>.
43. Arnold V. I. (1990) *Catastrophe Theory. 3rd Ed.* Moscow, Nauka Publ. 128 (in Russian).
44. Chernyshev S. N. (1983) *Rock Cracks*. Moscow, Nauka Publ. 293 (in Russian).
45. Martinson L. K., Malov Yu. I. (2011) *Differential Equations of Mathematical Physics. Ser. Mathematics at a Technical University. Vol. 12.* Moscow, Bauman MSTU. 369 (in Russian).