

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-333-341>

УДК 004.4+621.1+621.373.8

Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок

Часть 2

Канд. техн. наук Т. В. Рыжова¹⁾, Д. Н. Бухаров²⁾, докт. физ.-мат. наук, проф. 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)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Аннотация. В данной статье находят дальнейшее развитие модельные исследования по проведению аналогий возникновения возможных неоднородностей и дефектов фрактального типа на поверхности различных объектов под действием лазерного излучения в разных условиях и схемах лазерного имитационного эксперимента в сравнении с реальными процессами в камерах тепловых машин из-за контактов рабочего вещества с их поверхностью. Предмет такого рассмотрения связан с тем, что в лазерных схемах можно относительно легко и регулируемым образом управлять их топологией в разных модификациях (в диапазоне $1D-3D$ структур, образующихся на поверхностях разной геометрической формы фрактального типа). Это дает большие возможности для изучения различных часто возникающих нежелательных случайных дефектов и неоднородностей сложной конфигурации с развитием неожиданных процессов при динамических режимах работы энергетических установок разного типа в условиях их реальной эксплуатации и определяется с помощью геометрического анализа в рамках соответствующих нелинейных моделей с различными нелинейными фрактальными образами. Нами использовались в данном аспекте две модели для рассмотрения развития возникающих фрактальных трещиноватых структур: во-первых, диффузионное распространение/рост трещин разной геометрии с совокупностью локальных отрезков и фрагментов в различных направлениях; во-вторых, с диффузно-ограниченной агрегацией их распространения (*Diffusion-Limited Aggregation – DLA*) с использованием формализма клеточных автоматов в перколяционном приближении для разных алгоритмов образования фрактальных структур. Приведем только итоговые результаты расчетов без деталей их процедуры, что достаточно для наглядного и качественного определения процесса роста трещиноватости и дефектов. При этом конечной целью рассмотрения является изучение возникновения возможных и контролируемых локальных областей/коллекторов, начиная с поверхностных структур, и их ассоциация с реальными объектами на поверхности камер с рабочим веществом в энергосистемах. Обсуждается возможная практическая значимость подобного моделирования и анализа.

Ключевые слова: фрактальные модели, поверхностные дефекты и трещиноватые структуры, клеточные автоматы, перколяция, лазерно-индуцированные управляемые процессы, нелинейные образы, аналогия с энергетическими тепловыми установками, рабочее вещество в камере

Для цитирования: Рыжова, Т. В. Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок. Часть 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>

Modeling Processes of Emergence and Growth of Fractal Structures and Chamber Defects of Thermal Power Units

Part 2

T. V. Ryzhova¹⁾, D. N. Bukharov²⁾, 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)

Abstract. The paper describes further development of model studies with the purpose to draw analogies of the occurrence of possible inhomogeneities and defects of the fractal type on the surface of various objects under the action of laser radiation

Адрес для переписки

Рыжова Татьяна Викторовна
Белорусский национальный технический университет
Партизанский проспект, 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

for different conditions and schemes of a laser simulation experiment in comparison with real processes in the chambers of thermal machines due to the contacts of the working substances with their surface. The subject of this consideration is related to the fact that in laser schemes one can relatively easily and in a controlled manner to study their topology in various modifications (in the range of 0D–3D structures formed on surfaces of various geometric shapes of the fractal type). This provides great opportunities for studying various frequently occurring undesirable random defects and inhomogeneities of complex configuration with the development of unexpected processes in the dynamic modes of operation of various types of power units in their actual operation. This is determined by geometric analysis within the framework of the corresponding non-linear models with different non-linear fractal images. In this aspect, we have used two models to consider the development of emerging fractal fractured structures: first, diffusion propagation/growth of cracks of different geometry with a set of local segments and fragments in different directions; secondly, with diffusely limited aggregation of their distribution (Diffusion-Limited Aggregation – DLA) using the formalism of cellular automata in percolation approximation for different algorithms for the formation of fractal structures. We present only the final results of calculations without details of their procedure, which is sufficient for a visual and qualitative determination of the process of growth of fracturing and defects. In this case, the final goal of consideration is to study the emergence of possible and controllable local areas / collectors, starting from surface structures, and their association with real objects on the surface of chambers with a working substance in power systems. The possible practical significance of such modeling and analysis is discussed to forecast their working conditions.

Keywords: fractal models, surface defects and fractured structures, cellular automata, percolation, laser-induced controlled processes, nonlinear images, analogy with energetic thermal units, working substance in the chamber

For citation: 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. *Science and Technique*. 22 (4), 333–341. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-333-341> (in Russian)

Модели и алгоритмы рассмотрения формирования трещиноватости

В рамках данного подхода концептуально рассматриваются определенные правила присоединения групп дополнительных отрезков трещин к выделенной исходной линейной оси фрагмента доминирующей трещины, направление которой задается сложившейся анизотропией роста трещины под внешним однонаправленным воздействием, но без фиксации, по какой причине это происходит. Речь идет о следующем объекте – поверхности камеры с рабочим веществом тепловой установки. Это сделаем на примере наиболее удобной для этого диффузно-ограниченной агрегации (*DLA*-модели), позволяющей генерировать структуры трещиноватости с фрактальными размерностями из указанных выше отрезков трещин и учитывать различные дестабилизирующие процессы при их формировании.

Модель трещины в приближении *DLA* была реализована как клеточный автомат с окрестностью Мура [1, 2]. Влияние характеристик ее окружения в трещиноватой поверхности камеры учитывалось в коэффициенте вероятности консолидации разных отрезков (вероятностный параметр p), который представлялся нормированным коэффициентом вероятности для случайного пространственного развития трещиноватости из интервала обычных значений для вероятности p (0; 1].

Алгоритм построения модели центральной трещины с новыми отрезками в *DLA*-приближении формировался из нижеследующих этапов (рис. 1): 1) на этапе инициализации в расчетной области с наложенной равномерной сеткой генерировалась стартовая структура, состоящая из системы ячеек – элементов-зародышей трещин, расположенных на нижней границе, а также задавался размер центральной трещины (максимальное число элементов в расчетной области); 2) на верхней границе расчетной области генерировалось заданное количество отрезков трещин; 3) они совершали случайные смещения вниз и в стороны с одинаковой или различной вероятностью; 4) в случае их приближения к занятой ячейке расчетной области в рамках окрестности Мура реализовывалась их агрегация к занятой ячейке, иначе бы движение продолжалось; 5) такие шаги повторялись 2–4 раза. Критерием остановки данного итерационного процесса роста трещин-отрезков было достижение центральной трещиной требуемого размера, когда количество элементов в расчетной области достигало заданного значения и/или происходило касание трещины верхней границы ее проникновения (в финале – выход на наружную поверхность камеры), и/или реализовывалась остановка роста внутри камеры (тупиковая, висячая ветвь).

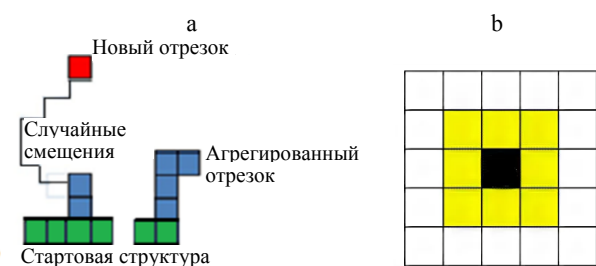


Рис. 1. Алгоритм построения модели центральной трещины с новыми отрезками в DLA-приближении:
 а – схема модели DLA развития трещины (красный квадрат – это новый элемент; зигзагообразная линия – это случайное удаление; синие квадраты – это совокупные элементы; зеленые квадраты – это начальная стартовая структура); б – окрестность Мура

Fig. 1. Algorithm for constructing a model of a central crack with new segments in the DLA-approximation:
 а – DLA model diagram for fracture propagation (red-square is a new element; zig-zag line is a random removal; blue squares are the aggregate elements; green squares are the initial start structure);
 б – the Moore area

На рис. 2 приведены модельные изображения трещин в приближении DLA в условной расчетной области размером 300×300 о. е. для 30000 элементов. На рис. 2а представлен случай равновероятного смещения присоединяющихся отрезков блуждающих трещин при постоянном значении вероятности $p = 1$. На рис. 2б представлена модель системы трещин для малых боковых смещений, возникающих/блуждающих отрезков при равномерном уменьшении вероятности их консолидации, начиная со значения вероятности $p = 1,00$ до $p = 0,01$. На рис. 2с сгенерирована система трещин для малых боковых смещений блуждающих отрез-

ков при равномерном уменьшении вероятности консолидации трещин, начиная со значений вероятности от $p = 0,50$ до $p = 0,01$.

Случай малых боковых смещений блуждающих отрезков трещин позволил на качественном уровне учесть действие анизотропии трещиноватости в камере под влиянием однонаправленного внешнего воздействия разной природы, когда рост структуры реализуется преимущественно по направлению этой выделенной анизотропии. Указанный выше характер изменения вероятности консолидации новых отрезков трещин соответствовал случаю процесса стабилизации системы трещиноватости.

Для разных значений вероятности p процесс генерации новых отрезков трещины останавливался вследствие достижения трещиной верхней границы выбранной области расчета, что соответствует выходу трещины на поверхность и/или ее изоляции внутри поверхности камеры. Сравнивая рис. 2а, б, с, можно заключить, что вероятности случайных боковых смещений отрезков трещин влияют на форму трещины в целом. Так, в случае малых вероятностей боковых смещений для появления новых отрезков трещин они генерируются более вытянутыми по вертикали с меньшей величиной и количеством боковых ответвлений.

Переход к абсолютным единицам, если имеются данные натурных измерений параметров трещиноватости (например, на определенных фрагментах тестовых тепловых установок) и/или по физическим локальным моделям на определенных участках камеры, позволяет провести сравнение модельных и экспериментальных результатов в аспекте оценки длин моделируемых структур.

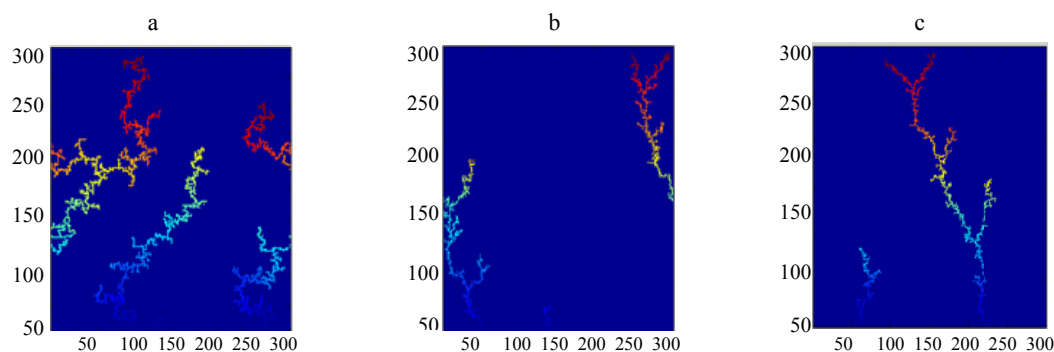


Рис. 2. Модели системы трещин в приближении DLA: а – равновероятные смещения возникающих/блуждающих отрезков трещин при постоянном значении вероятности $p = 1$ их образования; б – малые боковые смещения блуждающих отрезков трещин: равномерное уменьшение величины вероятности от значений $p = 1,00$ до $p = 0,01$;
 с – равномерное уменьшение вероятности p от 0,50 до 0,01

Fig. 2. Models of the crack system in the DLA-approximation: а – equiprobable displacements of emerging/wandering crack segments at a constant value of the probability $p = 1$ of their formation; б – small lateral displacements of wandering fracture segments: a uniform decrease in the probability value from $p = 1$ to $p = 0,01$; с – uniform decrease in probability p from 0.5 to 0.01

Задав длину стороны ячейки, например 1 мм (это определяется тем, какая проницаемость рабочего вещества и ее режим нами оценивается), получим максимальную длину в пределах 300–390 мм для случая равновероятных смещений. Это может соответствовать возникновению трещин при слабой анизотропии из-за наличия какого-либо направленного внешнего воздействия. Рамочные ограничения максимальной длины от 300 до 340 мм в случае малых боковых смещений могут соответствовать образованию трещин в случае более сильной анизотропии из-за внешнего воздействия.

Такие значения качественно верно могут отражать результаты трещинообразования на экспериментальных установках при их испытаниях в процессе конструирования под конкретные условия эксплуатации (ср. с моделями [2]), что и покажет реальную степень адекватности предложенной модели. Это должно позволить оценить последствия образования трещиноватости разной конфигурации на внутренних поверхностях камеры с рабочим веществом в тепловых энергетических установках.

Однако данное сопоставление представляет непростую задачу и может быть востребованным в специальных случаях, включая, например, ударные воздействия, сильные вибрации и ускорения в возимых энергетических установках, которые отличаются от стандартных условий эксплуатации в стационарных режимах. Тем не менее и для последнего случая такое моделирование может быть полезным при длительной их эксплуатации и проведении профилактики и планового технического обслуживания, а тем более при возникновении нестационарных процессов с переменными нагрузками во внешних энергетических сетях.

На типологию трещин также оказывают влияние величина и форма исходных элементов/очагов, из которых они формируются. Это отражено на рис. 3а, b, c, d. Так, в случае вертикальных структурных элементов общая форма трещин преимущественно вертикальная (рис. 3d). Когда элементы трещин обладают диагональной формой – ее форма также диагональная. В случае длинных структурных элементов вертикальной формы трещина достигает критической длины по техническим условиям за почти в два раза меньшее количество итераций – временных шагов ее развития.

Анализируя величину боковых ветвей полученных трещин, можно установить, что в случае вертикального роста она минимальна и не превосходит 1–3 мм в принятых нами единицах, что значительно меньше длины всей центральной трещины.

На форму оказывает влияние также стартовая структура, от которой происходит рост сети трещин. Так, на рис. 4 приведены изображения фрагментов трещин в рамках приближения *DLA* для окрестности Неймана, которая состоит из четырех исходных элементов и формируется из окрестности Мура удалением четырех диагональных ячеек. В качестве затравочной структуры использовался вертикальный фрагмент трещины шириной 1 о. е. (в нашей модели 1 мм). В данном случае процесс агрегации трещины не останавливался при достижении требуемой длины. Генерация системы трещин происходила до тех пор, пока было выполнено условие $N/S < \rho$, где N – количество отрезков в расчетной области; S – площадь расчетной области; ρ – относительная их поверхностная плотность. Так, на рис. 4 варьировались вероятность консолидации отрезков трещин в единую структуру при $\rho = 0,1$ и толщина ее структурных элементов.

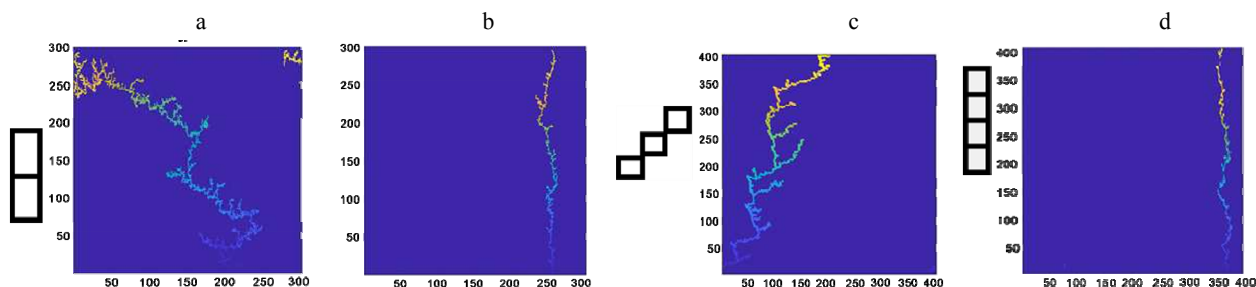


Рис. 3. Модели системы трещин в приближении *DLA* при вероятности $p = 1$: фрагмент вертикальных трещин из двух исходных элементов: а – равновероятный рост (слева), б – преимущественно вертикальный рост (справа); с – фрагмент диагональных трещин из исходных трех элементов; д – то же вертикальных трещин из четырех исходных элементов

Fig. 3. Models of the crack system in the *DLA*-approximation with probability $p = 1$: fragment of vertical cracks from two initial elements: a – equiprobable growth (left); b – predominantly vertical growth (right); c – fragment diagonal cracks from the original three elements; d – the same vertical cracks from the four original elements

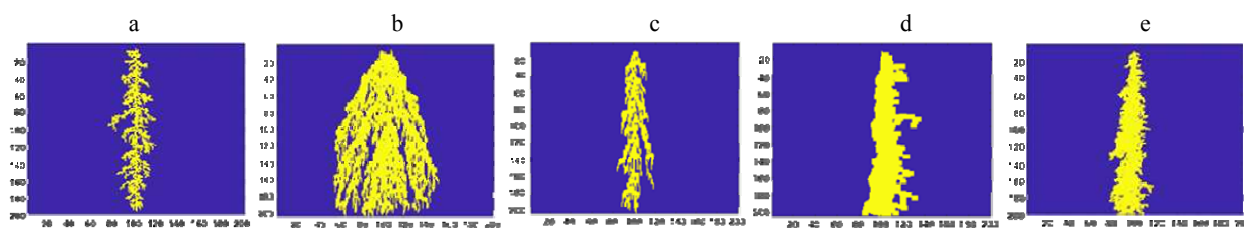


Рис. 4. Модели системы трещин в приближении *DLA*: а – единичный исходный структурный элемент, вероятность $p = 1,0$; б – $p = 0,5$, структурный исходный элемент из пяти единиц/элементов, равновероятный рост; в – $p = 0,1$, структурный элемент из пяти единиц, вертикальный рост; д – $p = 0,5$, структурный исходный элемент из пяти единиц, равновероятный рост шириной 10 о. е., вертикальный рост; е – $p = 0,5$, структурный исходный элемент из пяти единиц шириной 5 о. е., вертикальный рост

Fig. 4. Models of the crack system in the *DLA*-approximation: а – single initial structural element, probability $p = 1.0$; б – $p = 0.5$, structural initial element of five units/elements, equiprobable growth; в – $p = 0.1$, structural element of five units, vertical growth; д – $p = 0.5$, structural initial element of five units, equiprobable growth with width of 10 in arbitrary units, vertical growth; е – $p = 0.5$, structural initial element of five units with width of 5 in arbitrary units, vertical growth

Для указанного случая максимальная величина отклонения боковых ответвлений трещин не больше 2 о. е. (20 мм для вертикального роста) (рис. 4а, б). При равновероятном росте с разной шириной (рис. 4д, с, д) максимальная величина отклонения боковых веток трещин увеличивается до 5 о. е. (50 мм).

Толщина структурных элементов, как и их длина, оказывает значительное влияние на форму смоделированных трещин – в случае широких и длинных элементов их форма становится более однородной, наблюдается хорошая наполненность структуры. При этом соответственно фрактальная размерность значительно увеличивается при постоянной вероятности консолидации новых отрезков трещин и стремится от значений порядка 1,60 к 1,90 (2D-структура) или даже 2,02 (3D-фрагменты) в виде «деревьев» в проекции на горизонтальную плоскость разреза камеры.

Полученные модельные типы трещин и будут определять их проницаемость для рабочего вещества при динамических процессах подобного развития трещиноватости в камере тепловой установки с учетом возникающей карты давлений в такой 3D-сети. Это может в итоге приводить не только к понижению эффективности работы тепловой машины, но и к ее разрушению.

Аналоги формы возникновения коллекторных замкнутых зон/кластеров на внутренней поверхности камеры в контакте с рабочим веществом

Выше мы рассматривали развитие трещин в камере тепловой установки в модели домини-

рующих 1D-структур в условиях их возможной консолидации друг с другом в некоторые конфигурации за счет появления боковых отрезков – ветвления трещин, которые могут обеспечивать их пересечение.

Сейчас кратко остановимся на возможности процессов образования трещиноватых зон (кластеров) на внутренней поверхности камеры, где может аккумулироваться рабочее вещество в некотором стабильном состоянии до появления неустойчивого режима из-за внешних воздействий, приводящих к выбросу рабочей массы из такого коллектора по всей системе трещин.

Подобные коллекторы – пустотные дефектные зоны (кластеры), возникающие по разным причинам в камере, – удобно моделировать в рамках перколяционной модели, когда исходный этап формирования такой зоны начинается с очага напряжения – будущего его процесса разгрузки и в дальнейшем – с образованием дефекта. Далее он приводит к распространению от него напряжений с образованием характерной перколяционной фрактальной трещиноватой неоднородной структуры с возможной локализацией в определенной области на внутренней поверхности камеры с рабочим веществом.

Один из подходов такого моделирования сводится к следующему (приближение направленной перколяции по методу Эдена, ср. с [3]).

Как и в случае *DLA*, в модели Эдена фрактальная трещиноватость конфигурации дефектов в виде кластеров начинает генерироваться от начальной структуры в заранее заданной точке, расположенной в выбранной расчетной

области с наложенной на нее двумерной решеткой. В дальнейшем кластеры формируются путем добавления отрезков/ячеек трещиноватости по периметру такой решетки по определенному правилу выбранной модели.

На рис. 5 показаны возможные направления роста трещиноватого кластера Эдена, представленные окрестностями клеточного автомата порядка 1: в двух подходах – формализма Неймана (рис. 5a) и формализма Мура (рис. 5b). Соседей занятого участка определяют как четыре участка роста трещин (верхний, нижний, левый и правый, рис. 5a) или как восемь участков роста (рис. 5b). Каждая ячейка роста трещины, расположенная по периметру, имеет равные шансы быть выбранной и с заданной вероятностью добавленной в кластер.

На рис. 5 в центре закрашенная окружность – затравочная структура, незакрашенные окружности – распространяющиеся ячейки роста. Окрестность Неймана предоставляет четыре направления роста: вверх, вниз, влево и вправо (рис. 5a); окрестность Мура добавляет еще четыре диагонали к рис. 5a так, что появляются восемь направлений роста (рис. 5b).

Это промоделировано на рис. 6. Такой перколяционный трещиноватый кластер дефектов может быть построен путем применения клеточного автомата с различными функциями соседства (окрестностями), когда динамика роста рассматривается в динамике так называемых эпох развития трещиноватой структуры во времени.

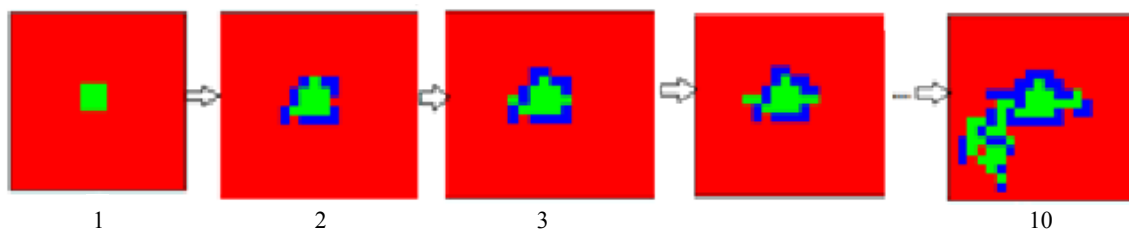


Рис. 6. Состояние расчетной области клеточного автомата после эпох 1–10 роста при реализации модели направленной перколяции

Fig. 6. Development process for the cellular automata calculation areas after epochs 1–10 of growth during implementation of directional percolation model

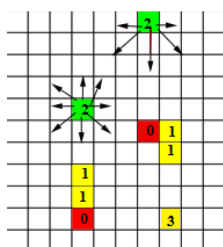


Рис. 7. Схема движения ячеек в рамках клеточного автомата с окрестностью Мура
Fig. 7. Scheme of cell movement within cellular automata with Moore's neighborhood

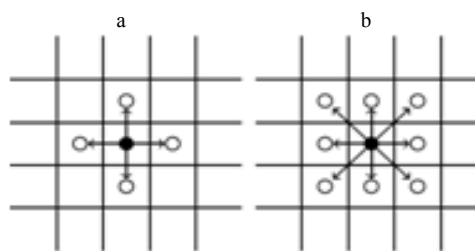


Рис. 5. Схема возможных направлений роста кластера Эдена: закрашенные черные круги – начальная площадь участка; открытые круги показывают направления роста застройки; а – для алгоритма Неймана выбираются 4 направления роста (вверх, вниз, влево, вправо); б – для алгоритма Мура необходимо добавить еще 4 диагональных направления, тогда возникает 8 направлений роста

Fig. 5. Scheme of possible growth directions for the Eden cluster: paint over circle is the initial ground area; open circles show the directions of development growth; a – for the Neiman algorithm 4 directions of growth occur (up, down, left, right); b – for the Moore algorithm the 4 diagonal directions have to be added, and then 8 growth directions occur

Нами и была разработана модификация указанной выше модели, для которой учитывалось время жизни ячеек трещиноватости и дефектов, правила движения/роста которых формировались на основе окрестности Мура (рис. 7). Ячейки выбрасывались в пространство с верхней границы расчетной области, двигались по ней до тех пор, пока не консолидировались с заданной вероятностью к затравочным или уже сформированным структурам дефектов, или пока их время жизни не заканчивалось. Если время жизни заканчивалось, то новая ячейка останавливалась в текущей ячейке сети и вокруг нее мог формироваться новый агрегат.

Для построения перколяционного фрактала в рамках ячеистой перколяции роста трещин и дефектов расчетная область разбивается равномерной сеткой, образуя ячейки. Они заполняются случайным образом, так что содержат 0 (пустой участок) или 1 (занятый участок) с заданной вероятностью p . Группа занятых ячеек решетки образует итоговую зону/кластер трещиноватости в виде деревьев [4].

Не останавливаясь на деталях, приведем совокупность одной из возможных конфигураций дефектов, образующихся на внутренней поверхности камеры (зон/кластеров) (рис. 8), так называемый фрактал Жюлия. Видно, что форма фрактальных структур дефектов варьируется от дендритной до округлой и от единичной до множественной.

Изображения ряда полученных в итоге совокупности таких дефектов на внутренней поверхности рабочей камеры энергетической установки – консолидированных фрактальных структур – в этом случае приведены на рис. 9.

Таким образом, в трещиноватой внутренней поверхности камеры с дефектами, вероятно, возникают конфигурации ансамбля пустот/коллекторов, где могут аккумулироваться массы рабочего вещества. Они являются сложными и отнюдь не сводятся к простым областям с непрерывными регулярными границами. Но в любом случае представленные нами модельные конфигурации могут рассматриваться как базовые локальные шероховатости к таким общепринятым дефектам в камере, существенно меняющим их функционирование и КПД теплового генератора, а также с учетом механизмов их дальнейшего

развития вплоть до разрушения объекта. Особенно это важно в аспекте оценки возможностей их внезапного высвобождения от масс рабочего вещества с выходом наружу с выхлопом триггерного типа из таких локализованных объемов с дефектами. Такое явление может происходить под действием разных внешних причин, перестраивающих 3D-сеть в трещиноватом массиве камеры, с возможными нежелательными последствиями для режимов работы всей энергетической установки в целом.

Поэтому явно недостаточно представлены данные явлений с возникающей трещиноватой сетью в рабочей камере в рамках простых моделей, определенных регулярных гидравлических систем, пусть даже довольно сложного вида (ср. с [5–8]). Оно является только весьма условным и может служить в качестве предварительного универсального анализа трендов и тенденций в единой пневмогидравлической системе тепловой машины. Но всегда требуется для практических целей учет ее специфики в конкретной установке, принципиально определяющей динамический режим функционирования и развития 3D-системы трещиноватости внутренней поверхности рабочей камеры и возможных последствий выхода рабочего вещества наружу с наступлением даже катастрофического события, особенно из-за действия внешних нестационарных процессов и неустойчивостей во внешней динамической среде (ср. с [9–12]) при экстремальных условиях [13,14]. Контроль жизненного цикла таких явлений можно анализировать в рамках моделей [15–18].

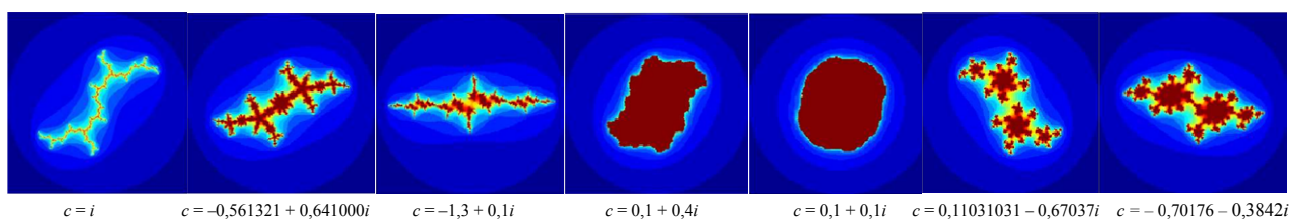


Рис. 8. Геометрическая фрактальная модель Жюлия для трещиноватости и дефектов

Fig. 8. Geometric fractal Julia model for fractures and defects

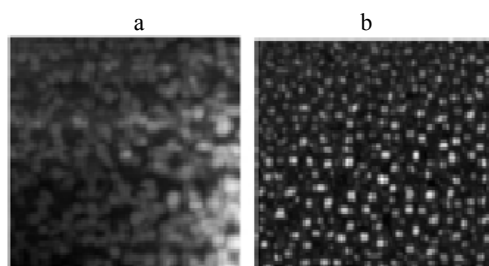


Рис. 9. Изображения полученного ансамбля фрактальных кластерных структур из-за образовавшихся дефектов: а – множество Жюлия; б – перколяционный механизм. (Можно провести аналогию с состоянием внутренней поверхности камеры в контакте с рабочим веществом тепловой установки при возникновении на ней неоднородностей)

Fig. 9. Images of the resulting ensemble of fractal cluster structures due to the formed defects: а – Julia set; б – percolation mechanism. (It is possible to draw an analogy with the state of the inner chamber surface being in contact with the working substance in the thermal plant in the event of inhomogeneities on it)

ВЫВОДЫ

1. Приведено общее качественное рассмотрение моделирования процессов как осаждения материалов на твердую поверхность различных сложных конфигураций, так и возникновения ее трещиноватости и дефектов фрактальных типов. Процедуры моделирования для такого анализа имеют достаточно универсальный характер в рамках определенных подходов, допускающих контролирование и регулирование развитием таких стохастических динамических нелинейных процессов.

2. Прослежены сходная динамика и аналогия формирования подобных структур, с одной стороны, в демонстрационных исследованиях и управляемом моделировании при лазерном поверхностном осаждении веществ разного состава и при воздействии лазерного излучения на подложку и материалы, включая газожидкостные и капельно-коллоидные системы с соответствующими физико-химическими процессами. Но, в то же время, данные процессы развиваются и в реальных высокотемпературных теплотехнологических жидкостно-газовых тепловых энергетических машинах разного типа. Это позволяет проводить мониторинг, предварительно оценивать их состояние в аспекте эффективности работы и прогнозировать безопасность работы в различных условиях и режимах.

3. В результате удается провести как численное и имитационное моделирование регулируемым образом возникающих динамических структур и неустойчивостей, так и разработать методы управления их конфигурацией и характеристиками в тестовых экспериментах по выявлению особенностей их жизненного цикла в условиях заданного регулирования развития динамических процессов.

4. Рассмотренные явления взаимодействия рабочего вещества в конкретных энергетических установках с внутренней поверхностью их технологических камер могут приводить к появлению определенных фиксированных стационарных зон локализации дефектов и трещиноватости разной конфигурации в них при состоянии рабочего вещества в разных физических условиях, которое выпадает из непрерывного цикла динамических процессов теплонагрева при эксплуатации тепловых установок. Это, с одной стороны, ведет к понижению эффективности и КПД тепловых машин, с другой – такие исходные локализованные

зоны (даже незначительные), являясь по сути очагами дефектов, стимулируют дальнейшее развитие неоднородностей и трещин на внутренних поверхностях тепловых камер, которые со временем могут трансформироваться в механические повреждения и разрушения. Для тепловых установок это может приводить к катастрофическим последствиям.

5. Можно считать, что рассматриваемая предварительная диагностика и моделирование таких очагов неоднородностей в процессах их возникновения и проведение неразрушающего контроля являются неотъемлемой частью эксплуатации тепловых установок в аспекте их технического обслуживания. Данный анализ удобно проводить в рамках подхода по аналогии с лазерными экспериментами с разными объектами и материалами, в которых можно детально исследовать подобные динамические явления с неустойчивостями и неоднородностями и управлять ими в заданном направлении уже на начальной стадии их возникновения в пространственных микро- и наномасштабах.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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>.
2. Goldenberga, J. Using Cellular Automata Modeling of the Emergence of Innovations / J. Goldenberga, S. Efronib // *Technological Forecasting & Social Change*. 2001. № 68. P. 293–308.
3. Богданова, Е. А. Имитационное моделирование как инструмент принятия решений / Е. А. Богданова, А. А. Шерстянкина // *Novaum*. 2017. № 6. С. 25–28.
4. 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>.
5. Хрусталева, Б. М. Техническая термодинамика: учеб.: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. Минск: Технопринт, 2004. Ч. 1. 486 с.
6. Техническая термодинамика: учеб. / В. И. Крутов [и др.]; под ред. В. И. Крутова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1991. 384 с.
7. Несенчук, А. П. Тепловые расчеты пламенных печей для нагрева и термообработки металла / А. П. Несенчук, Н. П. Жмакин. Минск: Высшая школа, 1974. 295 с.
8. Гликман, Б. Ф. Математические модели пневмогидравлических систем / Б. Ф. Гликман. М.: Наука, 1986. 368 с.
9. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / В. Я. Панченко [и др.]; под ред. В. Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. 664 с.
10. Введение в фемтонанопонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения

- и диагностики наноструктурированных материалов: учеб. пособие / С. М. Аракелян [и др.]; под общ. ред. С. М. Аракеяна. М.: Логос, 2015. 744 с.
11. Осаждение биметаллических кластеров Au/Ag с использованием метода лазерного осаждения наночастиц из коллоидных систем / А. А. Антипов [и др.] // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 116, № 2. С. 349–352. <https://doi.org/10.7868/S0030403414020032>.
 12. Шашин, В. М. Гидромеханика: учеб. / В. М. Шашин. М.: Высшая школа, 1990. 384 с.
 13. Рекуператор для регенеративного теплоиспользования тепловых отходов промышленных печей: патент № 13292 Республика Беларусь: МПК (2009) F27D17/00 / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский, А. П. Ракомсин [и др.]. Оpubл. 2010.06.30.
 14. Секционный рекуператор для промышленных печей: патент № 5378 U Республика Беларусь: МПК (2006) F27B3/00, F27B9/00, F27B13/00 / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский, А. П. Ракомсин [и др.]. Оpubл. 2009.06.30.
 15. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюрков; под ред. А. Г. Григорьянц. М.: Изд-во МГТУ, 2006. 664 с.
 16. Григорьянц, А. Г. Оборудование для лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюрков; ред. А. Г. Григорьянц. М.: Изд-во МГТУ, 2022. 285 с.
 17. Gross, M. S. Computer Simulation of the Processes of Engineering Materials with Laser Theory and First Applications / M. S. Gross, I. Black, W. H. Mueller // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36, No 7. P. 929–938. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/7/324>.
 18. Абляция тонких пленок молибдена с поверхности прозрачных подложек лазерными импульсами фемтосекундной длительности / А. Е. Гулевич [и др.]. Минск: Беларуская навука, 2012. С. 339–340.
- Поступила 19.01.2023
Подписана к печати 24.03.2023
Опубликована онлайн 31.07.2023
- REFERENCES
- 1 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>.
 - 2 Goldenberga J., Efronib S. (2001) Using Cellular Automata Modeling of the Emergence of Innovations. *Technological Forecasting & Social Change*, (68), 293–308.
 - 3 Bogdanova E. A., Sherstyankina A. A. (2017) Simulation Modeling as a Decision-Making Tool. *Novaum*, (6), 25–28 (in Russian).
 - 4 Kozlov G. V., Novikov V. U. (2001) A Cluster Model for the Polymer Amorphous State. *Physics-Uspokhi*, 44 (7), 681–724. <https://doi.org/10.1070/ptu2001v044n07abeh000832>.
 - 5 Khroustalev B. M., Nesenchuk A. P., Romanyuk V. N. (2004) *Technical Thermodynamics. Part I*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 486 (in Russian).
 - 6 Krutov V. I., Isaev S. I., Kozhinov I. A., Kozlov N. P., Kofanov V. I., Mironov B. M., Nikitin V. N., Petrazhit-skii G. B., Pylaev A. M., Khvostov V. I., Shishov E. V. (1991) *Technical Thermodynamics*. 3rd ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 384 (in Russian).
 7. Nesenchuk A. P., Zhmakin N. P. (1974) Thermal Calculations of Flame Furnaces for Heating and Heat Treatment of Metal. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 295 (in Russian).
 8. Glickman B. F. (1986) *Mathematical Models of Pneumohydraulic Systems*. Moscow, Nauka Publ. 368 (in Russian).
 9. Panchenko V. Ya. (ed.) (2009) *Laser Technologies for Material Processing: Modern Problems of Fundamental Research and Applied Development*. Moscow, Fizmatlit Publ. 664 (in Russian).
 10. Arakelyan S. M., Kucherik A. O., Prokoshev V. G., Rau V. G., Sergeev A. G. (2015) *Introduction to Femtosecond Nanophotonics: Fundamental Foundations and Laser Methods for the Controlled Production and Diagnostics of Nanostructured Materials*. Moscow, Logos Publ. 744 (in Russian).
 11. Antipov A. A., Arakelian S. M., Kutrovskaya S. V., Kucherik A. O., Vartanian T. A. (2014) Deposition of Bimetallic Au/Ag Clusters by the Method of Laser Deposition of Nanoparticles From Colloidal Systems. *Optics and Spectroscopy*, 116 (2), 324–327. <https://doi.org/10.1134/S0030400X14020039>.
 12. Shashin V. M. (1990) *Hydromechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola. 384 (in Russian).
 13. Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I., Rakomsin A. P., Gurchenko P. S., Mandel' N. L., Shishkov V. N., Ryzhova T. V., Kabishov S. M., Kovalev S. S., Khlebtsevich V. A. (2010) *Heat Exchanger for Regenerative Heat Recovery of Waste Heat From Industrial Furnaces*: Patent Republic of Belarus No. 13292 (in Russian).
 14. Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I., Rakomsin A. P., Gurchenko P. S., Trusova I. A., Shishkov V. N., Mandel' N. L., Ryzhova T. V., Kabishov S. M., Shidlovskii V. V., Khlebtsevich V. A. (2009) *Sectional Heat Exchanger for Industrial Furnaces*: Patent Republic of Belarus No 5378 (in Russian).
 15. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. (2006) *Technological Processes of Laser Processing*. Moscow, Publishing House Moscow State Technical University. 664 (in Russian).
 16. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. (2022) *Laser Processing Equipment*. Moscow, Publishing House Moscow State Technical University. 285 (in Russian).
 17. Gross M. S., Black I., Mueller W. H. (2003) Computer Simulation of the Processes of Engineering Materials with Laser Theory and First Applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36 (7), 929–938. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/7/324>.
 18. 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).

Received: 19.01.2023

Accepted: 24.03.2023

Published online: 31.07.2023