



Оригинальная статья

УДК 681.5.015

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-311-316



ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУР МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Л. П. Мышляев^{1,2}, К. Г. Венгер³, В. В. Грачев^{1,2}, К. А. Ивушкин⁴¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)² ООО «Научно-исследовательский центр систем управления» (Россия, 654005, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, пр. Строителей, 55а)³ Администрация Правительства Кузбасса (Россия, 650991, Кемерово, Советский пр., 62)⁴ ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой» (Россия, 654034, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Кузнецкое, 9)

Аннотация. Исследовательская работа посвящена управлению структурами материалов, которые описаны на основе фрактальных представлений. Формирование фрактальных структур материалов осуществляется за счет положительной обратной связи. Описан первый этап работы: постановки задач идентификации структур материалов на основе фрактальных представлений. Во многих исследованиях последнего времени указывается на фрактальную природу структур материалов, при этом в основе генерации фрактальных структур заложены механизмы положительных обратных связей. Фундаментальные физико-химические закономерности возникновения и трансформации структур материалов на настоящем этапе разработаны и представлены в таком виде, что их затруднительно использовать для синтеза алгоритмов управления структурами. Другими словами, они не отвечают требованиям моделей для управления – не отражают зависимость выходных воздействий от внешних факторов. Представляется полезным пойти по пути создания фрактальных моделей структур (то есть идентификации структур материалов) с последующей выработкой управляющих воздействий, в частности на параметры положительной обратной связи, для прогнозирования и изменения структуры материала в требуемом направлении. Это соответствует методу синтеза алгоритмов управления с оценкой состояний объекта управления и выбору коэффициентов усиления регулятора. Выполнены постановки задач идентификации изображений натуральных структур материалов на основе представлений динамического хаоса. Данные постановки задач использованы для разработки методов и алгоритмов идентификации структур материалов в различных отраслях промышленности, в том числе в горной и металлургической промышленности.

Ключевые слова: структура материала, положительная обратная связь, объекты с положительной обратной связью, идентификация, фрактальные модели

Финансирование: Работа выполнена по Госзаданию Минобрнауки России № 8.8611.2017/8.9.

Для цитирования: Мышляев Л.П., Венгер К.Г., Грачев В.В., Ивушкин К.А. Задачи идентификации структур материалов на основе фрактальных представлений // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 311–316. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-311-316>

Original article

PROBLEM OF IDENTIFICATION OF MATERIALS STRUCTURES BASED ON FRACTAL REPRESENTATIONS

L. P. Myshlyayev^{1,2}, K. G. Wenger³, V. V. Grachev^{1,2}, K. A. Ivushkin⁴¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)² LLC “Research Center of Control Systems” (55A Stroitelei Ave., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654005, Russian Federation)³ Administration of the Kuzbass Government (62 Sovetskii Ave., Kemerovo, 650991, Russian Federation)⁴ LLC United Company “Sibshahtostroi” (9 Kuznetskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654034, Russian Federation)

Abstract. The research work is devoted to the control of materials structures described on the basis of fractal representations. The formation of fractal structures of materials is carried out due to positive feedback. The article describes the first stage of the work – statements of the problem of identification of materials structures based on fractal representations. Many recent studies indicate the fractal nature of material structures, while the mechanisms of positive feedbacks are based on the generation of fractal structures. At the present stage, the fundamental physicochemical laws governing the emergence and transformation of material structures are developed and presented in such a way that it is difficult to use them for the synthesis of structure control algorithms. In other words, they do not meet the requirements of control models – they do not reflect the dependence of the output actions on external factors. Therefore, it seems useful to go along the path of creating fractal models of structures that are identification structures of materials and then development of control actions, in particular on the parameters of positive feedback for predicting and changing the material structure in the required direction. This corresponds to the method of control algorithms synthesis with an assessment of the control object state and choice of controller gain coefficient. In this work, the statements of the problem of identification images of natural materials structures are formulated. Firstly, fractal models are built using well-known (standard) fractals, and secondly, fractal models are generated using the fractal

structure formation mechanism. In the future, these statements of the problem will be used to develop methods and algorithms for materials structures identification in various industries, including mining and metallurgical industries.

Keywords: material structure, positive feedback, object with positive feedback, identification, fractal model

Funding: The work was performed according to the State Task of the Ministry of Education and Science of Russia no. 8.8611.2017/8.9.

For citation: Myshlyaev L.P., Wenger K.G., Grachev V.V., Ivushkin K.A. Problem of identification of materials structures based on fractal representations. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 311–316. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-311-316>

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные методы геометрии, широко используемые в естественных науках при описании структур материалов, в том числе в материаловедении, в горном деле, в нефтегазовой промышленности, в механике деформируемых тел, основаны на приближенной аппроксимации структуры исследуемого объекта геометрическими фигурами, метрическая и топологическая размерности которых равны между собой. При этом внутренняя структура исследуемого объекта игнорируется. Это приводит к утрате значительной части информации о свойствах и поведении исследуемых систем, которые заменяются более или менее адекватными моделями [1 – 3].

Однако известны ситуации, когда использование топологически неэквивалентных моделей принципиально недопустимо. Дробная метрическая размерность таких объектов не только характеризует их геометрический образ, но и отражает процессы их образования и эволюции, определяет динамические свойства [4 – 7].

В настоящее время известно большое количество реальных и модельных механических, физических, химических и биологических систем, в которых проявляется детерминированный хаос [8 – 18]. Хотя в математике уже давно известны объекты геометрии, имеющие дробную размерность, только недавно понятия о фракталах стало основой для рассмотрения различных окружающих нас природных форм, в том числе и для описания структур материалов [19 – 23].

Процессы, порождающие фрактальные структуры материалов, – обычные процессы с положительной обратной связью, в которых одна и та же операция выполняется снова и снова, когда результат одной итерации является начальным значением для следующей (см. рисунок) [5].

Зависимость между результатом и начальным значением, то есть динамический закон $X_{n+1} = f(X_n)$, выражается с помощью следующих формул [10]:

$$X_{n+1} = f(X_n) = X_n^2 + c;$$

$$X_{n+1} = f(X_n) = (1 + r)X_n - rX_n^2,$$

где X_n – переменная величина; $f(X_n)$ – функция преобразования; c – параметр, комплексная постоянная, причём $X_n, c \in \mathbb{C}$; r – коэффициент прироста.

Цель настоящей работы – сформулировать постановку задач идентификации структур материалов на основе фрактальных представлений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках исследования выполнены постановки задач идентификации изображений натуральных структур материалов [24, 25]:

- фрактальными моделями, построенными с помощью известных (типовых) фракталов;
- фрактальными моделями, сгенерированными с помощью механизма формирования фрактальной структуры.

Экспериментальные методы фрактального анализа предполагают аппроксимацию реальных (натуральных) структур материалов фракталами определенного поколения. При описании (идентификации) изображений натуральных структур можно идти двумя путями. Первый путь заключается в подборе настроечных коэффициентов или параметров при известном механизме формирования структуры. Этот способ осложняется тем, что фундаментальные исследования по поиску такого механизма формирования практически отсутствуют. Второй способ заключается в описании натуральных структур с использованием именно фрактальных представлений.

При идентификации материалов вторым способом возможны два варианта:

- описание структуры заранее готовыми фракталами;
- генерирование фрактальной структуры с использованием известных алгоритмов.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФРАКТАЛЬНЫМИ МОДЕЛЯМИ, ПОСТРОЕННЫМИ С ПОМОЩЬЮ ИЗВЕСТНЫХ (ТИПОВЫХ) ФРАКТАЛОВ

При первом варианте идентификации готовыми фракталами в зависимости от конечной цели построения моделей структуры материалов и имеющейся

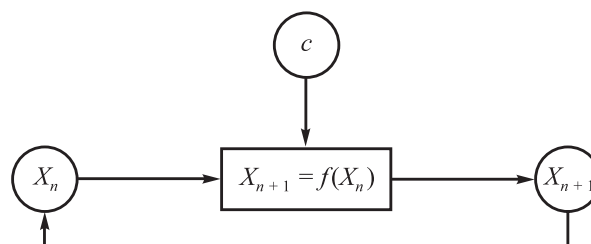


Схема формирования фрактальной структуры

Scheme of fractal structure formation

априорной информации можно сделать три постановки задач.

Постановка задачи I

Дано:

1. Натурные структуры материалов

$$St_j; j = \overline{1, J},$$

где j – номер структуры; J – количество структур.

2. Набор типовых фракталов

$$Fr_l; l = \overline{1, L},$$

где l – номер типового фрактала; L – количество фракталов.

3. Критерий идентификации

$$Q_{j,l} = \sum_{m,n;l=1}^{M,N,L} |St_j(m,n) - Fr_l(m,n)| \rightarrow \min,$$

где m, n – количество точек на изображении структуры.

4. Ограничение

$$M \in \overline{1, M^{\max}}; N \in \overline{1, N^{\max}},$$

где M^{\max}, N^{\max} – максимальное количество точек.

Требуется выбрать из набора Fr_l такой фрактал, для которого Q имеет минимальное значение.

Постановка задачи II

Дано:

1. Натурные структуры материалов

$$St_j; j = \overline{1, J}.$$

2. Набор типовых фракталов

$$Fr_l; l = \overline{1, L}.$$

3. Модель структуры материала

$$St_j^M = \sum_{j,l=1}^{J,L} \alpha_{ij} Fr_l + \varepsilon_j; j = \overline{1, J},$$

где α_{ij} – искомые весовые коэффициенты; ε_j – невязки модели (помеха).

4. Критерии идентификации

$$Q_j = \sum_{j=1}^J |St_j(m,n) - St_j^M(m,n)| \rightarrow \min; \tau_{\text{ре}} \rightarrow \min,$$

где $\tau_{\text{ре}}$ – время спада автокорреляционной функции невязки.

5. Ограничение

$$M \in \overline{1, M^{\max}}; N \in \overline{1, N^{\max}}.$$

Требуется следующее: определить оптимальные весовые коэффициенты α_{ij} ; определить наличие доминирующего типового фрактала.

Постановка задачи III

Дано:

1. Натурные структуры материалов

$$St_j; j = \overline{1, J}.$$

2. Набор типовых фракталов

$$Fr_l; l = \overline{1, L}.$$

3. Модель структуры материала

$$St_j^M \cup \left\{ \frac{Fr_l}{S_{kl}} \right\} + \varepsilon_j,$$

где S_{kl} – притягивающее пространство (площадь) натурной структурой l -типового фрактала; k – номер притягивающего пространства; ε_j – невязка модели.

4. Критерии идентификации

$$Q_j = \sum_{k=1}^K S_{kl} \sum_{m,n=1}^{M,N} \left| \frac{St_j(m,n) - St_j^M(m,n)}{S_{kl}(m,n)} \right| \rightarrow \min,$$

где K – число притягивающих пространств.

5. Ограничение

$$M \in \overline{1, M^{\max}}; N \in \overline{1, N^{\max}}; K \in \overline{1, K^{\max}},$$

где K^{\max} – максимальное число притягивающих пространств.

Требуется следующее: определить размеры пространства S_{kl} для величины Fr_l ; сформировать модель структуры из комбинации Fr_l/S_{kl} .

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФРАКТАЛЬНЫМИ МОДЕЛЯМИ, СГЕНЕРИРОВАННЫМИ С ПОМОЩЬЮ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

При втором варианте решения задачи идентификация изображения натурной структуры материала осуществляется путем формирования фрактальной структуры.

В самом общем виде постановка задачи идентификации структур материалов с использованием механизма генерации фракталов выглядит следующим образом.

Дано:

1. Натурные структуры материала

$$St_j; j = \overline{1, J}.$$

2. Математическая запись процедуры формирования фракталов [6]

$$X_{n+1} = f(X_n) = X_n^2 + c;$$

$$X_{n+1} = f(X_n) = (1+r)X_n - rX_n^2,$$

где r – коэффициент прироста.

3. Алгоритм генерации фракталов

$$Fr_l(r, c); l = \overline{1, L}.$$

4. Критерий идентификации

$$Q_j = \sum_{m, n=1}^{M, N} |St_j(m, n) - Fr_l(m, n, c)| \rightarrow \min.$$

5. Ограничение

$$M \in \overline{1, M^{\max}}; N \in \overline{1, N^{\max}}; L \in \overline{1, L^{\max}},$$

где L^{\max} – максимальное число математических записей.

Требуется определить параметры r, c , минимизирующие величину Q .

Выводы

Приведены четыре постановки задачи идентификации структур материалов на основе фрактальных представлений. Первые три постановки задачи идентификации структур материалов сделаны для случаев использования моделей на базе известных (типовых) фракталов, четвертая постановка задачи – при идентификации структур материалов сгенерированными фрактальными моделями.

В рамках последующих этапов работы на основе данных постановок задач были разработаны методы и алгоритмы идентификации структур материалов на основе фрактальных представлений. Реализация алгоритмов осуществлена на языке высокого уровня C# в среде Microsoft Visual Studio. Были проведены оценки эффективности разработанных методов и алгоритмов идентификации на модельных примерах и на натурных данных. В качестве натурных данных использованы образцы стали марки 35ХГСА, в качестве лабораторной базы – Центр коллективного пользования «Материаловедение» Сибирского государственного индустриального университета.

При проведении идентификации натурных структур образцов стали марки 35ХГСА методами на основе моделей известных (типовых) фракталов и методами с генерацией фрактальных моделей получены примерно одинаковые оценки. При этом использование методов идентификации с генерацией фрактальных моделей является более предпочтительным, так как отсутствует необходимость выбора заранее готовых фрактальных структур, что является также трудно формализуемой задачей.

По результатам натурных исследований сделан вывод об эффективности предложенных постановок задач, методов и алгоритмов идентификации, базирующихся на представлениях динамического хаоса, и о возможности их применения для идентификации натурных структур материалов и горных пород для горно-металлургической промышленности и в материаловедении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи: управление при неопределенности. М.: Наука, Физматлит, 1997. 352 с.
2. Robert C., Lee K. Optimal Estimation, Identification, and Control. Cambridge: MIT Press, 1966. 152 p.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 3-х томах. Т. 1. Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 748 с.
4. Benoit B. Mandelbrot. The Fractal Geometry of Nature. New York: Freeman, 1982. 468 p.
5. Peitgen H.-O., Richter P.H. The Beauty of Fractals. Images of Complex Dynamical Systems. Berlin: Springer-Verlag, 1986. 169 p.
6. Jens F. Fractals. New York: Plenum Press, 1988. 217 p.
7. Benoit B. Mandelbrot. Fractals in Physics. Trieste, ICTP, 1985. 623 p.
8. Васильев Н.И., Даченко Е.Н., Орлова И.О., Авакимян Н.Н., Лешкович Н.М. Фрактальный подход к увеличению нефтеотдачи пласта // Булатовские чтения. 2017. Т. 2. С. 54–56.
9. Хасанов М.М. Фрактальные характеристики динамики объектов управления // Автоматика и телемеханика. 1994. № 2. С. 59–67.
10. Жихарев Л.А. Фракталы в трехмерном пространстве. I-фракталы // Геометрия и графика. 2017. Т. 5. № 3. С. 55–66. https://doi.org/10.12737/article_59bfa55ec01b38.55497926
11. Avnir D. The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry. 1989. 232 p.
1. Emel'yanov S.V., Korovin S.K. New Types of Feedback: Control under Uncertainty. Moscow: Nauka, Fizmatlit, 1997, 352 p. (In Russ.).
2. Robert C., Lee K. Optimal Estimation, Identification, and Control. Cambridge: MIT Press, 1966, 152 p.
3. Methods of Classical and Modern Theory of Automatic Control. In 3 vols. Vol. 1. Analysis and Statistical Dynamics of Automatic Control Systems. Egupov N.D. ed. Moscow: Bauman STU, 2004, 748 p. (In Russ.).
4. Benoit B. Mandelbrot. The Fractal Geometry of Nature. New York: Freeman, 1982, 468 p.
5. Peitgen H.-O., Richter P.H. The Beauty of Fractals. Images of Complex Dynamical Systems. Berlin: Springer-Verlag, 1986, 169 p.
6. Jens F. Fractals. New York: Plenum Press, 1988, 217 p.
7. Benoit B. Mandelbrot. Fractals in Physics. Trieste, ICTP, 1985, 623 p.
8. Vasil'ev N. I., Datsenko E.N., Orlova I.O., Avakimyan N.N., Leshkovich N.M. Fractal approach to enhanced oil recovery. Bulatovskie chteniya. 2017, vol. 2, pp. 54–56. (In Russ.).
9. Khasanov M.M. Fractal characteristics of control objects dynamics. Avtomatika i telemekhanika. 1994, no. 2, pp. 59–67. (In Russ.).
10. Zhikharev L. A. Fractals in three-dimensional space. I-fractals. Geometry & Graphics. 2017, vol. 5, no. 3, pp. 55–66. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_59bfa55ec01b38.55497926
11. Avnir D. The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry. 1989, 232 p.

12. Avnir D., Farin D., Pfeifer P. A discussion of some aspects of surface fractality and of its determination // *New Journal of Chemistry*. 1992. Vol. 16. No. 4. P. 439–449.
13. Talibuddin S., Runt J.P. Reliability test of popular fractals techniques applied to small 2-dimensional self-affine data sets // *Journal of Applied Physics*. 1994. Vol. 76. No. 9. P. 5070–5078. <https://doi.org/10.1063/1.358490>
14. Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н. Процессы нефтегазодобычи – динамическая система // *Ученые записки Азерб. гос. нефтяной академии*. 1992. № 1. С. 24–30.
15. Lewerenz H.J. Fractal photocorrosion of silicon electrodes in concentrated ammonium fluoride // *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2007. Vol. 10. No. 8. P. 51–55. <https://doi.org/10.1149/1.2742503>
16. Hu Y.-Q., Zhao Y.-P., Yu T.-X. Fractal pattern formation in anodic bonding of pyrex glass/Al/Si // *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*. 2008. Vol. 9. No. 4. P. 315–322. <https://doi.org/10.1515/IJNSNS.2008.9.4.315>
17. Bao L., Ma J., Long W., He P., Zhang T., Nguyen V. Fractal analysis in particle dissolution: A review // *Reviews in Chemical Engineering*. 2014. Vol. 30. No. 3. P. 261–287. <https://doi.org/10.1515/revce-2013-0032>
18. Cipriani F., Sauvageot J.L. Fredholm modules on P.C.F. self-similar fractals and their conformal geometry // *Communications in Mathematical Physics*. 2009. Vol. 286. No. 2. P. 541–558. <https://doi.org/10.1007/s00220-008-0673-4>
19. Иванова В.Е., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
20. Kuznetsov P.V., Panin V.E., Schreiber J. Fractal dimension as a characteristic of deformation stages of austenite stainless steel under tensile load // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2001. Vol. 35. No. 2. P. 171–177. [https://doi.org/10.1016/S0167-8442\(00\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8442(00)00058-6)
21. Деревянко А.И., Сяо Цзефан. Фрактальная модель коррозии поверхности металлов // *Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ*. 2011. Вып. 3 (74). С. 152–156.
22. Holten T., Jossang T., Meakin P., Feder J. Fractal characterization of two-dimensional aluminum corrosion fronts // *Physical Review E*. 1994. Vol. 50. No. 2. P. 754–759. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.50.754>
23. Mansouri H., Ibrik K., Bensalah N., Abdel-Wahab A. Anodic dissolution of pure aluminum during electrocoagulation process: Influence of supporting electrolyte, initial pH, and current density // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011. Vol. 50. No. 23. P. 13362–13372. <https://doi.org/10.1021/ie201206d>
24. Starovackaya S.N., Myshlyaev L.P., Tsiryapkina I.V. Materials structure description by fractal complex. In: *External Fields Processing and Treatment Technology and Preparation of Metals and Alloys Nanostructure: Book of the International seminar articles, 1-7 October / Gromov V. ed. Siberian State Industrial University: Publishing Center SibSIU*, 2014. 348 p.
25. Грачев В.В., Мышляев Л.П., Циряпкина А.В., Макаров Г.В., Саламатин А.С., Раскин М.В. Разработка систем управления техническими и социально-экономическими объектами с положительной обратной связью (отчет о проведении НИР). Отчет по теме Госзадания Минобрнауки № 8611БЧ за 2019 г. Шифр работы 8.8611.2017/БЧ. № государственной регистрации АААА-А17-117033010034-9. Инв. АААА-Б20-220011790022-6.
12. Avnir D., Farin D., Pfeifer P. A discussion of some aspects of surface fractality and of its determination. *New Journal of Chemistry*. 1992, vol. 16, no. 4, pp. 439–449.
13. Talibuddin S., Runt J.P. Reliability test of popular fractals techniques applied to small 2-dimensional self-affine data sets. *Journal of Applied Physics*. 1994, vol. 76, no. 9, pp. 5070–5078. <https://doi.org/10.1063/1.358490>
14. Mirzadzhanzade A.Kh., Khasanov M.M., Bakhtizin R.N. Oil and gas production processes – A dynamic system. *Uchenye zapiski Azerb. gos. neftyanoi akademii*. 1992, no. 1, pp. 24–30. (In Russ.).
15. Lewerenz H.J. Fractal photocorrosion of silicon electrodes in concentrated ammonium fluoride. *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2007, vol. 10, no. 8, pp. 51–55. <https://doi.org/10.1149/1.2742503>
16. Hu Y.-Q., Zhao Y.-P., Yu T.-X. Fractal pattern formation in anodic bonding of pyrex glass/Al/Si. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*. 2008, vol. 9, no. 4, pp. 315–322. <https://doi.org/10.1515/IJNSNS.2008.9.4.315>
17. Bao L., Ma J., Long W., He P., Zhang T., Nguyen V. Fractal analysis in particle dissolution: A review. *Reviews in Chemical Engineering*. 2014, vol. 30, no. 3, pp. 261–287. <https://doi.org/10.1515/revce-2013-0032>
18. Cipriani F., Sauvageot J.L. Fredholm modules on P.C.F. self-similar fractals and their conformal geometry. *Communications in Mathematical Physics*. 2009, vol. 286, no. 2, pp. 541–558. <https://doi.org/10.1007/s00220-008-0673-4>
19. Ivanova V.E., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oksogoev A.A. *Synergetics and Fractals in Materials Science*. Moscow: Nauka, 1994, 383 p. (In Russ.).
20. Kuznetsov P.V., Panin V.E., Schreiber J. Fractal dimension as a characteristic of deformation stages of austenite stainless steel under tensile load. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2001, vol. 35, no. 2, pp. 171–177. [https://doi.org/10.1016/S0167-8442\(00\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8442(00)00058-6)
21. Derevyanko A.I., Syao Tsze fan. Fractal model of metal surface corrosion. *Sistemnye tekhnologii. Regional'nyi mezhvuzovskii sbornik nauchnykh rabot*. 2011, no. 3 (74), pp. 152–156. (In Russ.).
22. Holten T., Jossang T., Meakin P., Feder J. Fractal characterization of two-dimensional aluminum corrosion fronts. *Physical Review E*. 1994, vol. 50, no. 2, pp. 754–759. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.50.754>
23. Mansouri H., Ibrik K., Bensalah N., Abdel-Wahab A. Anodic dissolution of pure aluminum during electrocoagulation process: Influence of supporting electrolyte, initial pH, and current density. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011, vol. 50, no. 23, pp. 13362–13372. <https://doi.org/10.1021/ie201206d>
24. Starovackaya S.N., Myshlyaev L.P., Tsiryapkina I.V. Materials structure description by fractal complex. In: *External Fields Processing and Treatment Technology and Preparation of Metals and Alloys Nanostructure: Int. Seminar Articles*. Gromov V. ed. Siberian State Industrial University: Publishing Center SibSIU, 2014, 348 p.
25. Grachev V.V., Myshlyaev L.P., Tsiryapkina A.V., Makarov G.V., Salamatina A.S., Raskin M.V. *Development of control systems for technical and socio-economic facilities with positive feedback (Research report)*. Report on the State assignment of the Ministry of Education and Science no. 8611BCh for 2019. Work code 8.8611.2017 / BC, no. of state registration АААА-А17-117033010034-9. Inv. АААА-В20-220011790022-6. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Леонид Павлович Мышляев, д.т.н., профессор-консультант кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет, директор, ООО «Научно-исследовательский центр систем управления»

ORCID: 0000-0002-0833-4772

E-mail: mail@nicsu.ru

Константин Геннадьевич Венгер, к.т.н., заместитель губернатора Кузбасса по экономическому развитию, Администрация Правительства Кузбасса

ORCID: 0000-0001-8980-3763

Виталий Викторович Грачев, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет, ООО «Научно-исследовательский центр систем управления»

ORCID: 0000-0002-0615-3820

E-mail: vitaly.grachev@nicsu.ru

Константин Анатольевич Ивушкин, к.э.н., генеральный директор, ООО «Объединенная компания «Сибшхтрострой»

ORCID: 0000-0003-2904-3007

E-mail: ivushkin@okssh.ru

Leonid P. Myshlyayev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University, Director, LLC "Research Center of Control Systems"

ORCID: 0000-0002-0833-4772

E-mail: mail@nicsu.ru

Konstantin G. Venger, Cand. Sci. (Eng.), Vice Governor of Kuzbass for Economic Development, Administration of the Government of Kuzbass

ORCID: 0000-0001-8980-3763

Vitalii V. Grachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University, LLC "Research Center of Control Systems"

ORCID: 0000-0002-0615-3820

E-mail: vitaly.grachev@nicsu.ru

Konstantin A. Ivushkin, Cand. Sci. (Economics), General Director, LLC United Company Sibshakhtrostroy

ORCID: 0000-0003-2904-3007

E-mail: ivushkin@okssh.ru

Поступила в редакцию 18.03.2020

После доработки 08.09.2020

Принята к публикации 26.10.2020

Received 18.03.2020

Revised 08.09.2020

Accepted 26.10.2020