



УДК 622:788; 669.1

DOI 10.17073/0368-0797-2026-2-207-212



Оригинальная статья

Original article

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

И. С. Берсенева^{1,2}

¹ ООО «НПВП ТОРЭКС» (Россия, 620041, Екатеринбург, ул. Основинская, 8)

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

i.bersenev@torex-npvp.ru

Аннотация. Повышение роли окатышей как железорудного сырья ставит задачу обеспечения их высокого качества. Одним из наиболее важных факторов, влияющих на структуру и металлургические свойства окатышей, является особенность строения порового пространства. Связь между параметрами пор (объем, удельная поверхность) и металлургическими свойствами выражается через величину поверхности, контактирующей с газом-восстановителем, и прочность минерального каркаса окатыша. Выбор технических решений, обеспечивающих получение окатышей с высокими металлургическими свойствами, может быть осуществлен на основе понимания закономерностей формирования поровой структуры. Целью работы является исследование механизма формирования пор в окатышах с использованием двумерных клеточных автоматов с квадратной решеткой и окрестностью Мура. Величина расчетного поля составляла 8064 клетки. Моделирование выполнялось в среде MS Excel. Исследования показали, что уже на третьем – четвертом шаге происходит локализация пор и стабилизируется их величина. Согласно полученным данным, на втором шаге моделирования формируются наиболее крупные поры, которые в дальнейшем растут за счет поглощения мелких пустот. Кроме того, внутри твердого вещества остаются реликтовые поры, которые не смогли ассимилироваться с более крупными в связи со стохастической природой процесса. Таким образом, локализация пор в структуре определяется преимущественно первой стадией преобразования структуры. Для агломерата и окатышей – это грануляция шихты. На этой стадии выделяются и локализуются поры. Они имеют статистическое преимущество (начальный размер, наличие других пор рядом) и при дальнейшей термообработке растут за счет поглощения других пор. Удельная поверхность пор в окатышах за счет спекания, определенная с использованием модели клеточных автоматов, сокращается в 3,0 – 3,5 раза.

Ключевые слова: окатыши, пористость, удельная поверхность, клеточный автомат, моделирование, грануляция, объем порового пространства, эволюция пор

Для цитирования: Берсенева И.С. Исследование порового пространства железорудных окатышей с использованием модели клеточных автоматов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2026;69(2):207–212. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-2-207-212>

STUDY OF THE PORE SPACE OF IRON ORE PELLETS USING A CELLULAR AUTOMATON MODEL

I. S. Berseneva^{1,2}

¹ LLC NPVP TOREKS (8 Osnovinskaya Str., Yekaterinburg 620041, Russian Federation)

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

i.bersenev@torex-npvp.ru

Abstract. Strengthening the role of pellets as an iron ore raw material sets the task of ensuring their high quality. One of the most important factors affecting the structure and metallurgical properties of pellets are the structural features of the pore space. The relationship between the pore parameters (volume, specific surface area) and metallurgical properties is realized through the size of the surface in contact with the reducing agent gas and strength of the mineral pellet frame. The aim of the work is to study the mechanism of pore formation in pellets using the methodology of cellular automata. The study was conducted using two-dimensional cells with a square lattice and a Moore neighborhood. The calculated field value was

8064 cells. The simulation was performed in the MS Excel environment. Studies have shown that already at the third or fourth step, the pores are localized and their size is stabilized. According to the data obtained, at the second step of modeling, the largest pores are formed, which further grow due to the absorption of small voids. In addition, relict pores remain inside the solid, which could not assimilate with larger ones due to the stochastic nature of the process. Thus, the localization of pores in the structure is mainly determined by the first stage of structure transformation. For sinter and pellets, this is the granulation of the charge. At this stage, pores are isolated and localized. They have a statistical advantage (initial size, presence of other pores nearby) and during further heat treatment they grow due to the absorption of other pores. The specific surface area of pores in pellets due to sintering, determined using the cellular automaton model, is reduced by 3.0 – 3.5 times.

Keywords: pellets, porosity, specific surface area, cellular automaton, modeling, granulation, volume of pore space, evolution of pores

For citation: Berseneva I.S. Study of the pore space of iron ore pellets using a cellular automaton model. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(2): 207–212. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-2-207-212>

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объем производства железорудных окатышей демонстрирует положительную динамику: с 2015 по 2025 гг. производство окатышей в РФ выросло более, чем на 15 млн т/год [1; 2]. Соответственно, произошло увеличение потребления окатышей шахтными печами металлургии и выросла их доля в доменной шихте. Аналогичные тенденции наблюдаются в зарубежной практике [3]. Основные причины повышения объемов потребления окатышей обусловлены их преимуществом перед агломератом в экологическом аспекте и массовой доле железа [4; 5]. Усиление роли окатышей как железорудного сырья ставит задачу обеспечения их высокого качества. Одним из наиболее важных факторов, влияющих на структуру и металлургические свойства окатышей, является особенность строения порового пространства. Пористость окатышей определяется различными экспериментальными методами: ртутной порометрией [6 – 8], методом капиллярно-пористого тела [9], компьютерной томографией совместно с электронной микроскопией [10 – 12], рентгеновской (компьютерной) томографией [13], оптическими исследованиями микроструктуры окатышей [7; 14] и их макроструктуры [15 – 17]. Связь между параметрами пор (объем, удельная поверхность) и металлургическими свойствами выражается через величину поверхности, контактирующей с газом-восстановителем, и прочность минерального каркаса окатыша [14; 18; 19]. Выбор технических решений, обеспечивающих получение окатышей с высокими металлургическими свойствами, может быть осуществлен на основе понимания закономерностей формирования поровой структуры. Целью настоящей работы является исследование механизма формирования пор в окатышах с использованием методологии клеточных автоматов.

Клеточные автоматы – это дискретные математические модели, состоящие из регулярной сетки ячеек (клеток), каждая из которых может находиться в одном из конечных чисел состояний. Состояние всей системы эволюционирует пошагово в дискретном времени согласно заданным правилам, которые определяют новое свойство каждой ячейки на основе свойств её соседей [20; 21]. Начальное состояние поля исследований и законы изменения состояний отдельных кле-

ток могут задаваться как случайно, так и на основании априорно выбранных правил [22 – 24]. Применение клеточных автоматов в моделировании физико-химических процессов актуально там, где процессы инициируются стохастически, но в течении жизненного цикла подвергаются контролируемому внешнему воздействию. Применительно к порам в окатышах, такая модель вполне применима, поскольку начальная пористость формируется случайно и при обжиге она эволюционирует в направлении снижения свободной энергии. Исследования поровой структуры металлов с использованием данной методологии проведены разными авторами [25; 26], однако применительно к железорудному сырью такие исследования отсутствуют. В работах [27 – 29] приведены результаты оценки эволюции двухфазных кристаллических структур, которые могут быть применены к оксидным или керамическим материалам. Механизм формирования пор в зависимости от условий коагуляции изучен в статье [30]. Несмотря на значительную библиографию, вопрос о применимости использования клеточных автоматов при исследовании железорудного сырья (агломерат, окатыши) остается открытым. Цель настоящей работы – восполнить данный пробел. Важные вопросы, на которые позволяет ответить такое моделирование, состоят в следующем:

- насколько сильно снижается поверхность порового пространства окатышей при спекании;
- насколько велика роль механизма «поглощения» крупными порами мелких при спекании.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исследование проводилось с использованием двумерных клеточных автоматов с квадратной решеткой и окрестностью Мура. По классификации Уоллфрама, данный автомат относится к третьему классу [23]. Величина расчетного поля составляла 8064 клетки. Моделирование выполнялось в среде MS Excel. Каждая клетка может находиться в одном из двух дискретных состояний: 0 – пора, 1 – твердое вещество. Первоначальное состояние расчетного поля (шаг 1) задавалось генератором случайных чисел. Далее осуществлялось преобразование расчетного поля с применением правила: если в квадрате из 9 клеток (с заданной клеткой в центре) больше n клеток с значением 1, то она приоб-

ретаает значение 1. В противном случае ее значение «0». Было исследовано два варианта: $n_1 = 4$ и $n_2 = 5$, которые соответствуют ярко выраженным твердо- и жидкофазным разновидностям спекания. Физически эти ограничения обусловлены тем, что при твердофазном спекании необходимо больше единичных контактов между частицами. За пределами указанных параметров расчет уже на втором или третьем шаге приводил к практически полной ликвидации пор. Величины порового пространства были исследованы на двух уровнях: 28 – 33 и 48 – 53 % пор, что соответствует типичным объемам пор в окатышах и агломерате. Оценивалось изменение объема пор (площади клеточных автоматов с значением «0») и их поверхность (площадь контакта между клетками с разным значением).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведена типичная эволюция структуры в течение пяти шагов (слева – начальное состояние, справа – последнее) для трех вариантов: А – начальная пористость 50 %, спекание жидкофазное; Б – начальная пористость 28 %, спекание твердофазное; В – начальная пористость 32 %, спекание твердофазное. На рис. 2 приведены структуры пор железорудных окатышей фактически, полученные на основании результатов сканирования методом компьютерной томографии, и смоделированные (вариант В). Расчет периметров границы пор и твердого вещества для обоих рисунков выявил сопоставимые величины. Сравнение этих данных указывает, что выбранный модельный подход адекватен фактическим данным.

Из рис. 1 заметно, что уже на третьем – четвертом шаге происходит локализация пор и стабилизируется их величина. Видно, что уже на втором шаге моделирования формируются наиболее крупные поры, которые в дальнейшем растут за счет поглощения мелких пустот. Кроме того, даже на пятом шаге внутри твердого вещества остаются реликтовые поры, которые не смогли ассимилироваться с более крупными в связи со стохастической природой процесса. В таблице приведены изменения площади и периметра пор для семи вариантов (А – Ж). Видно сокращение периметра (который адекватен удельной поверхности пор [10; 11]) в 3,0 – 3,5 раза, при этом половина – уже на первом шаге. Также отмечается экстремальный характер (с локальным минимумом) изменения площади пор в вариантах Б и В.

Полученные данные позволяют сделать несколько научных и практических выводов. Во-первых, локализация пор в структуре определяется преимущественно первой стадией преобразования структуры. Для агломерата и окатышей – это грануляция шихты. На этой стадии выделяются и локализуются поры. Они имеют статистическое преимущество (начальный размер, наличие других пор рядом) и при дальнейшей термо-

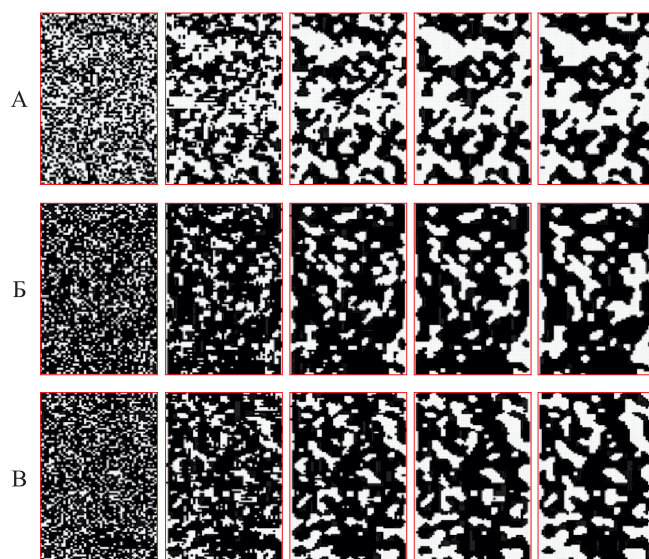


Рис. 1. Фрагменты структуры пор окатышей в эволюции: слева – первый шаг; справа – заключительный; белое – поры

Fig. 1. Fragments of the pellet pore structure in evolution: left – the first step; right – the final step; white – pores

обработке растут за счет поглощения других пор. Эти данные подтверждаются экспериментальными исследованиями структуры сухих и обожженных окатышей [11]. Во-вторых, для всех вариантов наблюдается трехкратное снижение величины удельной поверхности пор. Такая величина изменения удельной поверхности требует количественного уточнения, поскольку проходит по нижней границе оценок, данных другими авторами [4; 5; 10]. В-третьих, полученные результаты позволяют интерпретировать поровое пространство окатышей как систему, подчиняющуюся эволюцион-

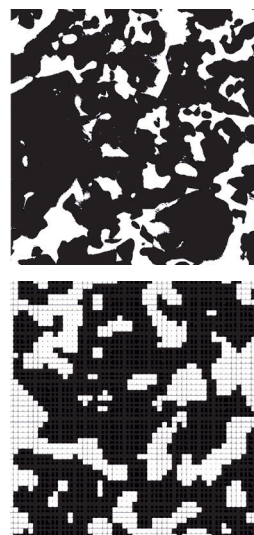


Рис. 2. Фрагменты структуры пор окатышей: сверху – фактические; снизу – смоделированные; белое – поры

Fig. 2. Fragments of the pellet pore structure: top – actual; bottom – simulated; white – pores

Результаты моделирования порового пространства

Results of pore space simulation

Вариант	Показатель, отн. ед.	Шаг			
		1	2	3	4
А – начальная пористость 50 %, спекание жидкофазное	Объем пор	0,49	0,49	0,49	0,49
	Площадь пор	0,40	0,21	0,15	0,12
Б – начальная пористость 28 %, спекание твердофазное	Объем пор	0,28	0,23	0,24	0,27
	Площадь пор	0,33	0,15	0,11	0,10
В – начальная пористость 32 %, спекание твердофазное	Объем пор	0,32	0,31	0,36	0,41
	Площадь пор	0,35	0,18	0,13	0,11
Г – начальная пористость 31 %, спекание жидкофазное	Объем пор	0,31	0,12	0,06	0,04
	Площадь пор	0,35	0,09	0,03	0,01
Д – начальная пористость 50 %, спекание твердофазное	Объем пор	0,50	0,75	0,88	0,95
	Площадь пор	0,40	0,17	0,08	0,03
Е – начальная пористость 40 %, спекание твердофазное	Объем пор	0,40	0,26	0,19	0,16
	Площадь пор	0,39	0,17	0,10	0,08
Ж – начальная пористость 40 %, спекание жидкофазное	Объем пор	0,40	0,52	0,63	0,72
	Площадь пор	0,39	0,21	0,14	0,10

ным закономерностям. Это, в свою очередь, открывает потенциал исследований с использованием современных методов моделирования процессов [31]. В-четвертых, эволюция объема пор весьма чувствительна к начальной пористости структуры и типу спекания (жидко- или твердофазное). Переход в жидкофазную область спекания со значительным увеличением количества расплава (или воды при сыром окомковании) приводит к заметному сокращению пористости (вариант Г). Высокая пористость куска при твердофазном спекании приводит к неконтролируемому росту пористости (вариант Д). Сравнивая варианты В и Г, видно, что жидкофазный процесс существенно ускоряет спекание, что соответствует современной теории и практике [5].

Безусловно, полученные результаты не учитывают ряд особенностей, присущих реальным окатышам или агломератам: усадку при спекании, газификацию отдельных веществ, химические преобразования и др. Кроме того, видится перспективным применение данного подхода к анализу грануляции окатышей, для чего необходимо дополнительно учесть формирование кластеров шихты и зародышей окатышей, неравномерность распределения влаги в шихте и др. [32]. Поэтому полученные результаты требуют развития за счет добавления соответствующих программных модулей и перехода в трехмерную расчетную область, что является задачей автора в ближайшем будущем.

Выводы

Локализация пор в структуре окатышей определяется на стадии грануляции шихты. На этой стадии

выделяются и образуются поры и затем те из них, которые имеют статистическое преимущество (начальный размер, наличие других пор рядом), растут при термообработке за счет поглощения других пор.

Удельная поверхность пор в окатышах за счет спекания, определенная с использованием модели клеточных автоматов, сокращается в 3,0 – 3,5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Петров С.П. Черная металлургия азиатской России во втором и третьем десятилетиях XXI века. Новосибирск: Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения РАН; 2023:240.
2. Буданов И.А. Макроэкономические перспективы производства металла. *Сталь*. 2024;(6):47–53.
Budanov I.A. Macroeconomic prospects of metal production. *Stal'*. 2024;(6):47–53. (In Russ.).
3. Kapelyushin Yu.E. Comparative review on the technologies of briquetting, sintering, pelletizing and direct use of fines in processing of ore and technogenic materials. *CIS Iron and Steel Review*. 2023;(2):4–11.
<http://doi.org/10.17580/cisirs.2023.02.01>
4. Юрьев Б.П., Спирин Н.А., Шешуков О.Ю. и др. Разработка технологий для производства железорудных окатышей с высокими металлургическими свойствами. Нижний Тагил: НТИ УрФУ; 2018:172.
5. Мальцева В.Е., Селезнев В.С., Чукин Д.М. Термообработка сырых окатышей: технология и схемы обжиговых машин. Москва: Металлургиздат; 2023:719.
6. Журавлев Ф.Н., Малышева Т.Я. Окатыши из концентратов железистых кварцитов. Москва: Металлургия; 1991:127.

7. Малышева Т.Я., Долицкая О.А. Петрография и минералогия железорудного сырья. Москва: МИСИС; 2004:422.
8. Медведева А.В., Мордасов Д.М., Мордасов М.М. Классификация методов контроля пористости материалов. *Вестник ТГТУ*. 2012;18(3):749–754.
Medvedeva A.V., Mordasov D.M., Mordasov M.M. Classification of control methods for materials porosity. *Vestnik TGTU*. 2012;18(3):749–754. (In Russ.).
9. Bersenev I.S., Sabirov E.R., Ishimbaev A.V., Matyukhin V.I. Study of the porosity of burnt pellets using the capillary-porous solids model. *Steel in Translation*. 2024;54(4):305–309.
<https://doi.org/10.3103/S0967091224700682>
10. Берсенеv И.С., Бижанов А.М., Сабиров Э.Р., Спирин Н.А. Определение удельной поверхности порового пространства железорудных окатышей. *Черные металлы*. 2025;(1):10–15. <https://doi.org/10.17580/chm.2025.01.02>
Bersenev I.S., Bizhanov A.M., Sabirov E.R., Spirin N.A. Determination of specific surface area of pore space of iron ore pellets. *Chernye Metally*. 2025;(1):10–15. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/chm.2025.01.02>
11. Gruzdev A.I., Bersenev I.S., Chernov M.S., Pigarev S.P., Gridasov I.N., Pokolenko A.Yu., Sabirov E.R., Spirin N.A. Study of the pore space structure of iron ore pellets using computer tomography. *Steel in Translation*. 2024;54(12):1145–1155.
<https://doi.org/10.3103/S0967091225700019>
12. Cavaliere P., Sadeghi B., Dijon L., Laska A., Koszelow D. Three-dimensional characterization of porosity in iron ore pellets: A comprehensive study. *Minerals Engineering*. 2024;213:108746.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108746>
13. Nie H., Qi B., Li Y., Qiu D., Wei H., Hammam A., Ahmed A., Yu Y. Structure analysis of pellets with different reduction degrees using X-ray micro-computed tomography. *Steel Research International*. 2023;94(1):2200241.
<https://doi.org/10.1002/srin.202200241>
14. Bersenev I.S., Vokhmyakova I.S., Ozornin N.K., Pokolenko S.I., Sabirov E.R., Spirin N.A. Porosity of iron-ore pellets at different stages of roasting and reduction. *Steel in Translation*. 2023;53(12):1137–1143.
<https://doi.org/10.3103/S096709122370002X>
15. Bersenev I.S., Pokolenko S.I., Sabirov E.R., Spirin N.A., Borisenko A.V., Kurochkin A.R. Influence of the iron ore pellets macrostructure on their strength. *Steel in Translation*. 2023;53(11):1018–1022.
<https://doi.org/10.3103/S0967091223110062>
16. Usol'tsev D.Yu., Bersenev I.S., Bardavelidze G.G., Sabirov E.R., Spirin N.A., Isaenko G.E. On the formation of porosity in fluxed iron-ore pellets. *Steel in Translation*. 2022;52(10):859–863.
<https://doi.org/10.3103/S0967091222090133>
17. Берман Ю.Л. Основные закономерности производства окатышей. Челябинск: Metallurgy; 1991:184.
18. Scharm C., Küster F., Laabs M., Huang Q., Volkova O., Reinmöller M., Guhl S., Meyer B. Direct reduction of iron ore pellets by H₂ and CO: In-situ investigation of the structural transformation and reduction progression caused by atmosphere and temperature. *Minerals Engineering*. 2022;180:107459.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107459>
19. Nguyen C.-S., Nguyen T.-H., Nguyen S.L., Bui A.-H. Study on the reducibility of iron ore pellets at high temperature. *Physical Sciences / Physics, Engineering*. 2021;63(4):3–7.
[https://doi.org/10.31276/VJSTE.63\(4\).03-07](https://doi.org/10.31276/VJSTE.63(4).03-07)
20. Белоус Д.Д., Тыртышников А.Ю., Гордиенко М.Г. Клеточно-автоматный подход для прогнозирования изменения распределения пор по размерам в процессе пиролиза. *Успехи в химии и химической технологии*. 2016;XXX(4):108–110.
Belous D.D., Tyrtshnikov A.Yu., Gordienko M.G. Cellular-automaton approach to predict the changes of the pore size distribution during the pyrolysis process. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2016;XXX(4):108–110. (In Russ.).
21. Кучинский Н.А., Васецкий А.М., Кениг Е.Я., Кольцова Э.М. Моделирование процесса формирования покрытия гранул на основе теории клеточных автоматов. *Фундаментальные исследования*. 2013;(4):1069–1073.
Kuchinsky N.A., Vasetsky A.M., Kenig E.Ya., Koltsova E.M. Cellular automata for mathematical modeling of coating formation on the granules. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013;(4):1069–1073. (In Russ.).
22. Бандман О.Л. Параллельная реализация клеточно-автоматных алгоритмов моделирования пространственной динамики. *Сибирский журнал вычислительной математики*. 2007;10(4):335–348.
Bandman O.L. Parallel implementation of cellular automata algorithms for simulation of spatial dynamics. *Sibirskii zhurnal vychislitel'noi matematiki*. 2007;10(4):335–348. (In Russ.).
23. Wolfram S. Twenty problems in the theory of cellular automata. *Physica Scripta*. 1985;T9:170–183.
<https://doi.org/10.1088/0031-8949/1985/T9/029>
24. Gu C., Ridgeway C.D., Cinkilic E., Lu Y., Luo A.A. Predicting gas and shrinkage porosity in solidification microstructure: A coupled three-dimensional cellular automaton model. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020;49:91–105. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.028>
25. Mendoza-Cuy A., Begambre-Carrillo O., Villalba-Morales J.D. Topology optimization of steel slotted dampers with the hybrid cellular automata technique. *Advances in Engineering Software*. 2025;206:103921.
<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2025.103921>
26. Bozsóki I., Illés B., Géczy A. Numerical simulation of Sn grain growth in composite solder joint using a modified cellular automaton model. *Results in Engineering*. 2025;26:104669.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104669>
27. Lian Y., Lin S., Yan W., Liu W.K., Wagner G.J. A parallelized three-dimensional cellular automaton model for grain growth during additive manufacturing. *Computational Mechanics*. 2018;61:543–558.
<https://doi.org/10.1007/s00466-017-1535-8>
28. Guo Z., Zhou J., Yin Y., Shen X., Ji X. Numerical simulation of three-dimensional mesoscopic grain evolution: Model Development, validation, and application to nickel-based superalloys. *Metals*. 2019;9(1):57.
<https://doi.org/10.3390/met9010057>
29. Lopez-Botello O., Martinez-Hernandez U., Ramirez J., Pinna C., Mumtaz K. Two-dimensional simulation of grain structure growth within selective laser melted AA-2024. *Materials & Design*. 2017;113:369–376.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.031>

30. Guo C., Sheng X., Chu C., Dong Y., Pu Y., Lin P. A cellular automaton simulation of the degradation of porous polylactide scaffold: I. Effect of porosity. *Materials Science and Engineering: C*. 2009;29(6):1950–1958.
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2009.03.003>
31. Бекетов С.М., Зубкова Д.А., Редько С.Г. Эволюционные методы оптимизации цифровых моделей организационных систем: литературный обзор. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2024;(52);55–75.
Beketov S.M., Zubkova D.A., Red'ko S.G. Evolutionary methods of optimization of digital models of organizational systems: A literary review. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, Information Technologies, Control Systems*. 2024;(52);45–75. (In Russ.).
32. Павловец В.М. Особенности развития техники и технологии окомкования железорудной шихты в производстве окатышей. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(5):529–537.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-529-537>
Pavlovets V.M. Development of equipment and technology for pelletizing iron ore charge in production of pellets. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(5):529–537.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-529-537>

Сведения об авторах

Иван Сергеевич Берсенева, к.т.н., руководитель научно-аналитического отдела, ООО «НПВП ТОРЭКС»; доцент кафедры металлургии железа и сплавов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0009-0000-4270-6042
E-mail: i.bersenev@torex-npvp.ru

Information about the Authors

Ivan S. Bersenev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Scientific and Analytical Department, LLC NPVP TOREKS; Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy of Iron and Alloys, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0009-0000-4270-6042
E-mail: i.bersenev@torex-npvp.ru

Поступила в редакцию 12.05.2025
После доработки 27.11.2025
Принята к публикации 02.12.2025

Received 12.05.2025
Revised 27.11.2025
Accepted 02.12.2025