

Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 1 (106). С. 55–73.
Cherepovets State University Bulletin, 2022, no. 1 (106), pp. 55–73.

Научная статья

УДК 004.021

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-1-106-5>

Определение приоритетности критериев в оптимизационной задаче выбора шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи

Оксана Сергеевна Логунова^{1✉}, Наталья Сергеевна Сибилева²

^{1, 2}Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
Магнитогорск, Россия,

¹logunova66@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

²natus224@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7242-2622>

Аннотация. Целью исследования является создание алгоритма для определения приоритетности критериев в оптимизационной задаче выбора шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи. Особенность решаемой задачи состоит в том, что шихту необходимо представить в виде смеси, в которой каждый компонент содержит заданное количество химических элементов, трудно удаляемых в ходе плавки. Требования по наличию этих элементов обуславливаются рядом целевых функций. При решении задачи требуется определить приоритетность достижения цели исходя из важности каждого критерия.

В работе представлен алгоритм установления приоритетности критериев и продемонстрировано его функционирование на примере трех критериев по минимизации количества остаточных элементов (хрома, никеля и меди) при выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи. Основные этапы работы – классификация требований к качеству шихтовых материалов, упорядочивание списка критериев, построение алгоритма формализации задачи выбора шихтовых материалов, создание методики определения наиболее оптимальных критериев. Ранжирование критериев выполнено на основании экспертных заключений.

Авторами статьи проведена оценка компетентности экспертов с помощью алгоритма Л. Г. Евланова и В. А. Кутузова, в ходе которой была выявлена равнозначная компетентность экспертов на различных итерациях. В результате исследования синтезирован список критериев для математического обеспечения задачи многокритериальной оптимизации формирования структуры шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи. Это позволяет привести задачу к однокритериальному виду и использовать соответствующие методы решения.

Ключевые слова: многокритериальная задача оптимизации, теория предпочтений, дуговая сталеплавильная печь, содержание остаточных элементов, ранжирование критериев, оценка компетентности экспертов

Для цитирования: Логунова О. С., Сибилева Н. С. Определение приоритетности критериев в оптимизационной задаче выбора шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 1 (106). С. 55–73. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-1-106-5>.

Determining the priority of criteria in the optimization problem of selecting charge materials for an electric furnaceOksana S. Logunova^{1✉}, Natalia S. Sibileva²^{1, 2}Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia,¹logunova66@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>²natus224@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7242-2622>

Abstract. The aim of the study is to build an algorithm for determining the priority of criteria in the optimization problem of selecting the charge materials for an electric arc furnace. The problem being solved is to provide the charge in the form of a mixture, in which each element introduces a predetermined amount of chemical elements that are difficult to remove during melting. The requirements for the content of these elements are determined by several target functions. When solving the problem, it becomes necessary to prioritize achieving the goal according to the importance of each criterion. In this work, the authors provided an algorithm for choosing the preference of criteria and demonstrated its functioning using the example of three criteria for minimizing the amount of residual elements of chromium, nickel and copper when melting steel in an electric arc furnace. The main stages of work are: classification of requirements for the quality of charge materials; formalization of the criteria list; algorithm development for formalizing the problem of choosing charge materials; methodology development for determining preferences among three criteria. The criteria are ranked with reference to expert assessments.

An assessment of the experts' competence has been carried out applying the algorithm of L. G. Evlanov and V. A. Kutuzov, which shows equal experts' competence at various iterations. As a result of the study, the authors provided a list of criteria for the mathematical support of multicriteria optimization when forming the structure of charge materials for an electric arc furnace. This makes it possible to bring the problem to a single-criterion kind and apply the appropriate solution methods.

Keywords: multicriteria optimization problem, preference theory, electric arc furnace, content of residual elements, ranking of criteria, assessment of expert competence

For citation: Logunova O. S., Sibileva N. S. Determining the priority of criteria in the optimization problem of selecting charge materials for an electric furnace. *Cherepovets State University Bulletin*, 2022, no. 1 (106), pp. 55–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-1-106-5>.

Введение

Средства современной математики могут быть применены для решения типовых задач в самых различных областях. Проблема, как правило, сводится к умению типизировать задачу и учитывать особенности технологических процессов при ее постановке и последующей формализации. Задачи принятия решений в многокритериальной среде требуют реализации дополнительных шагов, связанных с установлением требований к условию протекания технологических процессов и их дальнейшей экспертной оценке по приоритетности критериев. В исследовании рассматривается возможность и необходимость использования теории предпочтения при утверждении приоритетности критериев для металлургической отрасли и, в частности, при определении структуры шихтовых материалов при выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи.

Эффективность работы крупного предприятия во многом зависит от рационального использования основных видов сырья в зависимости от требований заказчика к свойствам продукции¹. Основными видами сырья для металлургической промышленности являются металлический лом, чугун и альтернативные материалы. Требования к свойствам готовой продукции определяются механическими характеристиками, такими как прочность, предел прочности, предел текучести, пластичность, ударная вязкость, твердость. Выполнение этих требований приводит к созданию интеллектуальных систем управления производствами² и технологическими процессами³. Одними из элементов систем интеллектуальной поддержки автоматизированных комплексов управления являются математические модели процессов, которые, в свою очередь, трансформируются в задачи оптимизации с множеством критериев⁴ и назначением приоритетности⁵.

¹ Corrales L. C. N., Lambán M. P., Hernandez Korner M. E., Royo J. Overall Equipment Effectiveness: Systematic Literature Review and Overview of Different Approaches // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, iss. 18. URL: https://www.researchgate.net/publication/345031959_Overall_Equipment_Effectiveness_Systematic_Literature_Review_and_Overview_of_Different_Approaches (дата обращения: 15.08.2021); Xie S., Xie Y., Huang T., Gui W. Multiobjective-Based Optimization and Control for Iron Removal Process under Dynamic Environment // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. Vol. 17, iss. 1. P. 569–577. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2975273>; Zaroni S., Ferretti I., Zavanella L. E. Energy savings in reheating furnaces through process modelling // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 42. P. 205–210. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.071>.

² Mittal S., Khan M. A., Romero D., Wuest T. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2019. Vol. 233, iss. 5. P. 1342–1361. <https://doi.org/10.1177/0954405417736547>; Panetto H., Iung B., Ivanov D., Weichhart G., Wang X. Challenges for the Cyber-Physical Manufacturing Enterprises of the Future // *Annual Reviews in Control*. 2019. Vol. 47. P. 200–213. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.02.002>.

³ Салганик В. М., Полецков П. П., Кухта Ю. Б., Егорова Л. Г. Управление качеством горячекатаного проката по профилю и плоскостности на базе использования автоматизированной системы // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2010. № 1. С. 59–62; Wang G.-D. Technology innovation and development direction of iron and steel industry // *Kang T'ieh / Iron and Steel*. 2015. Vol. 50, iss. 9. P. 1–10. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20150319>.

⁴ Peng X., Yang Y. Algorithms for interval-valued fuzzy soft sets in stochastic multi-criteria decision making based on regret theory and prospect theory with combined weight // *Applied Soft Computing*. 2017. Vol. 54. P. 415–430. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.06.036>; Wei G., Alsaadi F. E., Hayat T., Alsaadi A. A Linear Assignment Method for Multiple Criteria Decision Analysis with Hesitant Fuzzy Sets Based on Fuzzy Measure // *International Journal of Fuzzy Systems*. 2017. Vol. 19, iss. 3. P. 607–614. <https://doi.org/10.1007/s40815-016-0177-x>; Yu K., Liang J., Qu B., Yue C. Purpose-directed two-phase multiobjective differential evolution for constrained multiobjective optimization // *Swarm and Evolutionary Computation*. 2021. Vol. 60. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100799>.

⁵ Сибилева Н. С., Логунова О. С. Теория предпочтения и многокритериальность при выборе структуры шихтовых материалов // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й международной научно-технической конференции / под*

Методы

Классификация требований к технологии выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи и качеству шихтовых материалов, приводящих к увеличению объема производства

К критериям эффективного функционирования промышленного предприятия относятся рациональное использование основных видов сырья в зависимости от требований заказчика к свойствам производимой продукции¹. Одним из способов интеллектуализации управления производственным процессом выплавки стали в условиях электросталеплавильного цеха крупного предприятия является эффективный выбор целевых функций в интерактивном конструкторе задачи оптимизации работы дуговой сталеплавильной печи². Алгоритм выбора подразумевает наличие формализованных требований к технологии производства стали в печи данного вида, включающих шесть основных групп признаков, структура которых представлена на рис. 1.

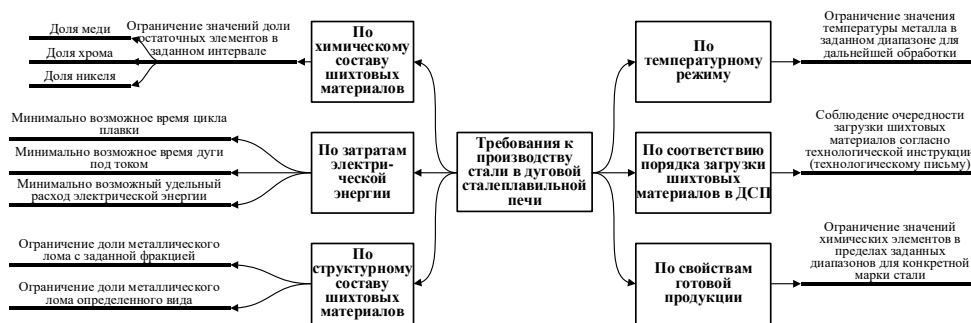


Рис. 1. Схема классификации требований к производству стали в дуговой сталеплавильной печи

редакцией С. В. Пыхтуновой. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2018. Т. 1. С. 241–242; Wu J.-Z., Beliakov G. Nonmodularity index for capacity identifying with multiple criteria preference information // Information Sciences. 2019. Vol. 492. P. 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.04.025>; Bai C., Zhang R., Qian L., Wu Y. Comparisons of probabilistic linguistic term sets for multi-criteria decision making // Knowledge-Based Systems. 2017. Vol. 119. P. 284–291. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.12.020>.

¹ Lu Y.-Z., Chen Y.-W., Chen M.-R., Chen P., Zeng G.-Q. Extremal Optimization: Fundamentals, Algorithms, and Applications. Boca Raton: Auerbach Publications, 2016. 350 p.; Qian F., Zhong W., Du W. Fundamental Theories and Key Technologies for Smart and Optimal Manufacturing in the Process Industry // Engineering. 2017. Vol. 3, iss. 2. P. 154–160. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.02.011>.

² Логунова О. С., Сибилева Н. С., Павлов В. В. Система интеллектуальной поддержки выбора шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи: консолидация эмпирической и экспертной информации // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2016. Т. 4, № 2. С. 26–31; Павлов В. В., Ивин Ю. А., Пехтерев С. В., Мацко И. И., Логунова О. С. Влияние фракционного состава металлолома на показатели работы дуговой сталеплавильной печи // Электromеталлургия. 2011. № 11. С. 2–6.

Перечень требований может варьироваться, комбинироваться и расширяться с учетом возможностей производства, желаний заказчика, направления исследования, а также по достижении максимальной экономической эффективности при выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи.

С точки зрения требований к сокращению энергетических затрат на выплавку стали в печи данного вида необходимо обеспечить минимально возможные время цикла плавки, время дуги под током и удельный расход электрической энергии.

Требования по соблюдению температурного режима прежде всего определяются исходя из допустимых диапазонов температуры металла с целью создания условий для его дальнейшей обработки на следующих этапах производственного цикла.

Требования к свойствам готовой продукции диктуются механическими характеристиками, получение которых, в свою очередь, зависит от выплавляемых марок стали; для каждой из них необходимо соблюдение в установленных пределах долевого соотношения химических элементов, приносимых в металл с шихтовыми материалами.

Требования к сырью, загружаемому в дуговую сталеплавильную печь, могут быть рассмотрены с разных точек зрения:

– с точки зрения химического состава шихтовых материалов допустимо выдвижение требований к достижению значений доли содержания остаточных элементов (меди [Cu], %; хрома, [Cr], %; никеля [Ni], %) в получаемом полупродукте с учетом допустимых диапазонов, регламентируемых стандартами;

– с точки зрения соответствия порядка загрузки шихтовых материалов в дуговую сталеплавильную печь предполагается строгое соблюдение (в общем случае) регламента технологической инструкции, а в каких-либо конкретных случаях – технологического письма, уточняющего или дополняющего некоторые положения вышеупомянутого документа;

– с точки зрения структурного состава шихтовых материалов допустимо выдвижение требований, состоящих в ограничении доли металлического лома с заданной фракцией и заданным видом (скрап, автомобильный лом, обреш и т. д.).

Указанный перечень требований может быть расширен в соответствии с условиями, которые изменяются при модернизации производства, технологии или структуры заказов.

Формализация списка критериев для математического обеспечения задачи оптимизации формирования структуры шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи

Классификация требований, предъявляемых к технологии производства стали в дуговой сталеплавильной печи, позволяет синтезировать многокритериальную задачу оптимизации формирования химического состава шихтовых материалов для печи такого вида согласно разработанной авторами методике¹. При этом статистический

¹ Логунова О. С., Сибилева Н. С., Павлов В. В. Система интеллектуальной поддержки выбора шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи: консолидация эмпирической и

анализ экспериментальных данных позволил выявить ряд важных дополнительных ограничений, которые необходимо учесть при установлении критериев:

– общая масса сырья, в основном состоящего из металлического лома ($m_{л}$) и чугуна ($m_{ч}$) в различном процентном соотношении в зависимости от режима работы дуговой сталеплавильной печи и ограниченного вместимостью печи, а также ее рациональным использованием:

$$m^{\min} \leq m_{л} + m_{ч} \leq m^{\max}; \quad (1)$$

– масса металлического лома, минимальное и максимальное значения которой ограничены требованиями режимов работы дуговой сталеплавильной печи:

$$m_{л}^{\min} \leq m_{л} \leq m_{л}^{\max}; \quad (2)$$

– масса чугуна, минимальное и максимальное значения которой ограничены требованиями режимов работы дуговой сталеплавильной печи:

$$m_{ч}^{\min} \leq m_{ч} \leq m_{ч}^{\max}; \quad (3)$$

– температура металла на выходе из дуговой сталеплавильной печи (T), ограниченная минимальным и максимальным значениями, обеспечивающими пригодность металла для дальнейшей обработки на следующих этапах производственного цикла:

$$T^{\min} \leq T \leq T^{\max}; \quad (4)$$

– процентное содержание кислорода (S_{O_2}), серы (S_S) и фосфора (S_P), минимальные и максимальные значения которых ограничены требованиями стандартов к маркам стали:

$$\begin{aligned} S_{O_2}^{\min} &\leq S_{O_2} \leq S_{O_2}^{\max} \\ S_S^{\min} &\leq S_S \leq S_S^{\max} \\ S_P^{\min} &\leq S_P \leq S_P^{\max} \end{aligned} \quad (5)$$

В задаче необходимо определить химический состав шихтовых материалов таким образом, чтобы доли содержания никеля ($[Ni]$, %), меди ($[Cu]$, %) и хрома ($[Cr]$, %) в стали принимали минимальные значения:

$$\begin{aligned} S_{Ni} &= a_{11}m_{л} + a_{12}m_{ч} \rightarrow \min, \\ S_{Cu} &= a_{21}m_{л} + a_{22}m_{ч} \rightarrow \min, \\ S_{Cr} &= b_{62}S_{Cu} + b_{64}S_S + b_{65}S_P \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (6)$$

где a_{ij} – эмпирические коэффициенты для экзогенных переменных $\{m_{л}, m_{ч}, T\}$; b_{ij} – эмпирические коэффициенты для эндогенных переменных $\{S_{Ni}, S_{Cu}, S_{O_2}, S_S, S_P, S_{Cr}\}$;

m_d – масса металлического лома; $m_{\text{ч}}$ – масса чугуна; S_{Ni} – доля содержания никеля [Ni], %; S_{Cu} – доля содержания меди [Cu], %; S_{Cr} – доля содержания хрома [Cr], %.

Алгоритм формализации задачи оптимизации с точки зрения теории предпочтения критериев

Математическая формализация задачи формирования химического состава шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи требует решения в многокритериальной среде. Для приведения многокритериальных задач к более простому виду используются элементы теории предпочтения критериев¹, являющейся основой для преобразования задачи многокритериальной оптимизации в задачу однокритериальной оптимизации².

Выполним математическую формализацию задачи оптимизации с множеством критериев, выбираемых с помощью средств интерактивного конструктора, с точки зрения теории предпочтения критериев. Для этого определим терминологию задачи с позиции принятия решений в многокритериальной среде.

Задачи оптимизации с множеством критериев, которые создаются с помощью средств интерактивного конструктора³, требуют установления приоритетности критериев. Процесс постановки задачи по оптимизации структуры шихтовых материалов представлен в работе О. С. Логуновой, Е. Г. Филиппова, В. В. Павлова, И. В. Павлова «Постановка взаимосвязанных задач многокритериальной оптимизации состава шихты для дуговых электросталеплавильных печей»⁴. Блок-схема алгоритма определения приоритетности критериев изображена на рис. 2.

¹ Подиновский В. В., Потапов М. А. Важность критериев в многокритериальных задачах принятия решений: теория, методы, софт и приложения // Открытое образование. 2012. № 2. С. 55–61; Подиновский В. В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 64 с.

² Подвесовский А. Г. Методы принятия решений. Методы оптимальных решений. Брянск: БГТУ, 2010. 196 с.; Подиновский В. В., Потапов М. А., Нелюбин А. П., Подиновская О. В. Теория важности критериев: современное состояние и направления дальнейшего ее развития // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. ВСПУ–2014 (г. Москва, 16–19 июня 2014 г.). Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. С. 7697–7702; Соловьев В. И. Методы оптимальных решений. Москва: Финансовый университет, 2012. 364 с.

³ Logunova O. S., Sibileva N. S. Intelligent Support System of Steel Technical Preparation in an Arc Furnace: Functional Scheme of Interactive Builder of the Multi Objective Optimization Problem // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 287. URL: https://www.researchgate.net/publication/322215964_Intelligent_Support_System_of_Steel_Technical_PrPrPrepara_in_an_Arc_Furnace_Functional_Scheme_of_Interactive_Builder_of_the_Multi_Objective_Optimization_Problem (дата обращения: 15.08.2021).

⁴ Логунова О. С., Филиппов Е. Г., Павлов В. В., Павлов И. В. Постановка взаимосвязанных задач многокритериальной оптимизации состава шихты для дуговых электросталеплавильных печей // Вестник НТУ «ХПИ». 2012. № 62 (968). С. 121–129.

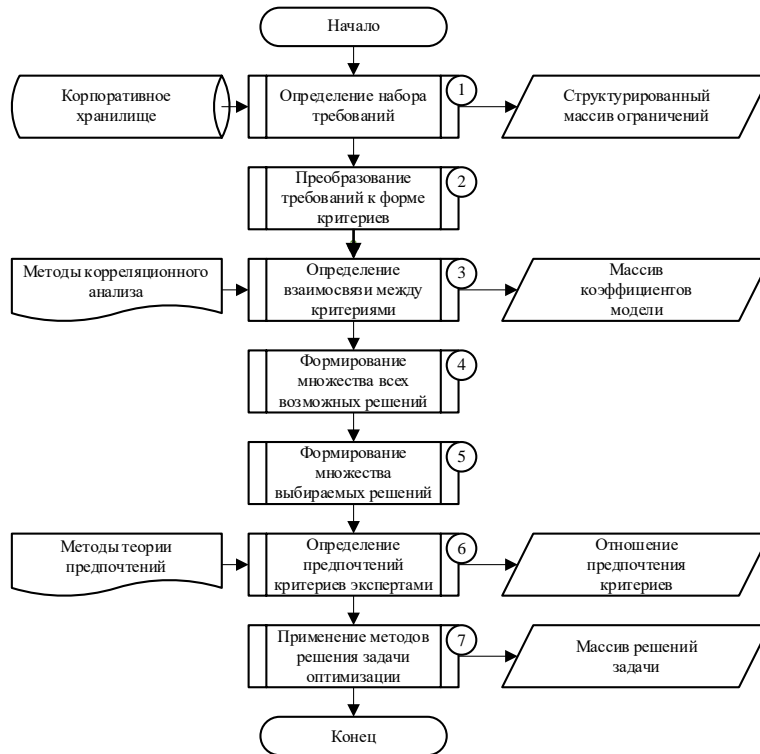


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения приоритетности критериев

Каждому шагу соответствует свой номер блока алгоритма на рис. 2:

1) определение набора требований к производству стали в дуговой сталеплавильной печи, представляющих собой ограничение значений доли содержания никеля ([Ni], %) меди ([Cu], %) и хрома ([Cr], %) в заданном стандартом интервале;

2) преобразование требований к форме критериев и формирование множества $Sel Y$, заключающего в себе цели решаемой задачи: $Sel Y = \{ f_{S_{Ni}}, f_{S_{Cu}}, f_{S_{Cr}} \}$, где $f_{S_{Ni}}$ – доля содержания никеля ([Ni], %); $f_{S_{Cu}}$ – доля содержания меди ([Cu], %); $f_{S_{Cr}}$ – доля содержания хрома ([Cr], %);

3) определение взаимосвязи между критериями показано в формуле (6);

4) формирование множества всех возможных решений X , предлагаемых для выбора. Минимальное количество элементов этого множества равно двум. Верхней границы количество возможных решений не имеет: оно может быть как конечным, так и бесконечным. В задаче минимизации содержания хрома, никеля и меди в стали множество всех возможных решений $X = (m_i)$, где (m_i) – вектор загрузки дуговой сталеплавильной печи, компоненты которого определяют массу каждой составляющей (в данном случае – массу металлического лома $m_{л1}$ и чугуна $m_{ч1}$);

5) формирование множества выбираемых решений $Sel X$ – определенного подмножества множества всех возможных решений X , представляющего собой решение

задачи выбора. Выбранным или наилучшим является такое возможное решение, которое наиболее полно удовлетворяет желаниям, интересам и целям заказчика. Это стремление достичь определенной цели выражается в виде максимизации или минимизации некоей числовой функции, заданной на множестве X . В условиях задач, решаемых с помощью средств интерактивного конструктора, могут существовать несколько таких функций, которые образуют векторный критерий;

б) определение предпочтений критериев (б) (для преобразования задачи многокритериальной оптимизации в задачу оптимизации с одним критерием);

7) применение методов решения задачи многокритериальной оптимизации (с помощью наиболее предпочтительных из них): методов уступок, свертывания критериев, ограничений и генетического алгоритма¹.

Результаты

Ранжирование альтернатив

Рассмотрим методику выявления предпочтений критериев для задачи определения химического состава шихтовых материалов в дуговой сталеплавильной печи (п. 6 алгоритма).

На примере анализируемой задачи видим, что векторный критерий состоит из трех целевых функций:

$$\vec{f} = (f_{S_{Ni}}, f_{S_{Cu}}, f_{S_{Cr}}), \quad (7)$$

где $f_{S_{Ni}}$ – доля содержания никеля ([Ni], %); $f_{S_{Cu}}$ – доля содержания меди ([Cu], %); $f_{S_{Cr}}$ – доля содержания хрома ([Cr], %).

Установить вектор предпочтений зачастую можно лишь на основе опыта экспертов, работающих в условиях действующего производства. В рамках исследования десять экспертов (работники сталеплавильной лаборатории, исследователи научной группы, потенциальные заказчики) проранжировали указанные целевые функции по важности (1 – очень важный критерий; 2 – критерий средней степени важности; 3 – критерий низкой степени важности).

Результаты оценки приведены в табл. 1.

¹ Логунова О. С., Сибилева Н. С., Павлов В. В. Результаты сравнительного анализа решения многокритериальной задачи оптимизации для расчета структуры шихтовых материалов дуговой сталеплавильной печи // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2014. № 2 (5). С. 54–64; Торчинский В. Е., Сибилева Н. С., Логунова О. С. Особенности применения генетического алгоритма для оптимизационной задачи о структуре шихтовых материалов дуговой сталеплавильной печи // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3 (40). С. 63–69.

Таблица 1

Результаты ранжирования критериев по важности

Критерий	Эксперты										Сумма оценок
	Э1	Э2	Э3	Э4	Э5	Э6	Э7	Э8	Э9	Э10	
Процентное содержание меди ([Cu], %)	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1	14
Процентное содержание хрома ([Cr], %)	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	16
Процентное содержание никеля ([Ni], %)	1	3	2	2	1	1	2	1	1	1	15

Для ранжирования критериев по групповой оценке и последующего расчета ранга каждого из них были определены групповая оценка (столбец «Сумма оценок» в табл. 1), нормированная оценка каждого критерия и соответствующий ранг (см. табл. 2).

Таблица 2

Нормированные оценки и матрица рангов

Критерий	Нормированные оценки	Ранг
Процентное содержание меди ([Cu], %)	0,311	1
Процентное содержание хрома ([Cr], %)	0,356	3
Процентное содержание никеля ([Ni], %)	0,333	2

Цепочка ранжирования альтернатив (отношение предпочтения критериев) имеет следующий вид:

$$[Cu] \succ [Ni] \succ [Cr]. \quad (8)$$

Оценка компетентности экспертов

Оценка компетентности экспертов проводилась с помощью алгоритма, предложенного Л. Г. Евлановым и В. А. Кутузовым¹; он основан на итеративной процедуре корректировки коэффициентов компетентности.

На первом шаге $t = 1$ (итерации) все коэффициенты компетентности равны между собой:

$$K_i^1 = \frac{1}{10}, \quad i = 1, \dots, 10, \quad (9)$$

¹ Евланов Л. Г., Кутузов В. А. Экспертные оценки в управлении. Москва: Экономика, 1978. 133 с.

где K_i^1 – коэффициенты компетентности экспертов на первой итерации.

Итерационный расчет коэффициентов компетентности при $t = 2$ представлен в табл. 3.

Таблица 3

Итерационный расчет коэффициентов компетентности экспертов (x_j^2) при $t = 2$

Критерий	x_j^2
Процентное содержание меди ([Cu], %)	$x_1^2 = K_1^1 \cdot x_{11} + K_2^1 \cdot x_{21} + K_3^1 \cdot x_{31} + K_4^1 \cdot x_{41} + K_5^1 \cdot x_{51} + K_6^1 \cdot x_{61} + K_7^1 \cdot x_{71} + K_8^1 \cdot x_{81} + K_9^1 \cdot x_{91} + K_{10}^1 \cdot x_{101} = \frac{1}{10} \cdot (1+1+2+1+2+2+1+1+2+1) = \frac{14}{10} = 1,4$
Процентное содержание хрома ([Cr], %)	$x_2^2 = K_1^1 \cdot x_{12} + K_2^1 \cdot x_{22} + K_3^1 \cdot x_{32} + K_4^1 \cdot x_{42} + K_5^1 \cdot x_{52} + K_6^1 \cdot x_{62} + K_7^1 \cdot x_{72} + K_8^1 \cdot x_{82} + K_9^1 \cdot x_{92} + K_{10}^1 \cdot x_{102} = \frac{1}{10} \cdot (1+2+1+2+2+1+2+1+2+2) = \frac{16}{10} = 1,6$
Процентное содержание никеля ([Ni], %)	$x_3^2 = K_1^1 \cdot x_{13} + K_2^1 \cdot x_{23} + K_3^1 \cdot x_{33} + K_4^1 \cdot x_{43} + K_5^1 \cdot x_{53} + K_6^1 \cdot x_{63} + K_7^1 \cdot x_{73} + K_8^1 \cdot x_{83} + K_9^1 \cdot x_{93} + K_{10}^1 \cdot x_{103} = \frac{1}{10} \cdot (1+3+2+2+1+1+2+1+1+1) = \frac{15}{10} = 1,5$

$$\lambda^2 = 1,4 \sum_{i=1}^{10} x_{i1} + 1,6 \sum_{i=1}^{10} x_{i2} + 1,5 \sum_{i=1}^{10} x_{i3} = 1,4 \cdot 14 + 1,6 \cdot 16 + 1,5 \cdot 15 = 67,7,$$

где λ^2 – показатель для корректировки коэффициента компетентности на второй итерации; x_j^2 – экспертная оценка важности критерия на второй итерации.

Итерационный расчет коэффициентов компетентности представлен в табл. 4.

Таблица 4

Итерационный расчет коэффициентов компетентности экспертов (K_i^2) при $t = 2$

Номер эксперта, i	K_i^2
1	2
1	$K_1^2 = \frac{1}{67,7} (x_1^2 \cdot x_{11} + x_2^2 \cdot x_{12} + x_3^2 \cdot x_{13}) = \frac{1,4 \cdot 1 + 1,6 \cdot 1 + 1,5 \cdot 1}{67,7} = 0,06647$
2	$K_2^2 = \frac{1}{67,7} (x_1^2 \cdot x_{21} + x_2^2 \cdot x_{22} + x_3^2 \cdot x_{23}) = \frac{1,4 \cdot 1 + 1,6 \cdot 2 + 1,5 \cdot 3}{67,7} = 0,13441$
3	$K_3^2 = \frac{1}{67,7} (x_1^2 \cdot x_{31} + x_2^2 \cdot x_{32} + x_3^2 \cdot x_{33}) = \frac{1,4 \cdot 2 + 1,6 \cdot 1 + 1,5 \cdot 2}{67,7} = 0,10930$
4	$K_4^2 = \frac{1}{67,7} (x_1^2 \cdot x_{41} + x_2^2 \cdot x_{42} + x_3^2 \cdot x_{43}) = \frac{1,4 \cdot 1 + 1,6 \cdot 2 + 1,5 \cdot 2}{67,7} = 0,11226$
5	$K_5^2 = \frac{1}{67,7} (x_1^2 \cdot x_{51} + x_2^2 \cdot x_{52} + x_3^2 \cdot x_{53}) = \frac{1,4 \cdot 2 + 1,6 \cdot 2 + 1,5 \cdot 1}{67,7} = 0,11078$

Продолжение таблицы 4

1	2
6	$K_6^2 = \frac{1}{67,7}(x_1^2 \cdot x_{61} + x_2^2 \cdot x_{62} + x_3^2 \cdot x_{63}) = \frac{1,4 \cdot 2 + 1,6 \cdot 1 + 1,5 \cdot 1}{67,7} = 0,08714$
7	$K_7^2 = \frac{1}{67,7}(x_1^2 \cdot x_{71} + x_2^2 \cdot x_{72} + x_3^2 \cdot x_{73}) = \frac{1,4 \cdot 1 + 1,6 \cdot 2 + 1,5 \cdot 2}{67,7} = 0,11226$
8	$K_8^2 = \frac{1}{67,7}(x_1^2 \cdot x_{81} + x_2^2 \cdot x_{82} + x_3^2 \cdot x_{83}) = \frac{1,4 \cdot 1 + 1,6 \cdot 1 + 1,5 \cdot 1}{67,7} = 0,06647$
9	$K_9^2 = \frac{1}{67,7}(x_1^2 \cdot x_{91} + x_2^2 \cdot x_{92} + x_3^2 \cdot x_{93}) = \frac{1,4 \cdot 2 + 1,6 \cdot 2 + 1,5 \cdot 1}{67,7} = 0,11078$
10	$K_{10}^2 = \frac{1}{67,7}(x_1^2 \cdot x_{101} + x_2^2 \cdot x_{102} + x_3^2 \cdot x_{103}) = \frac{1,4 \cdot 1 + 1,6 \cdot 2 + 1,5 \cdot 1}{67,7} = 0,0901$

В таблице введены следующие обозначения: K_i^2 – коэффициенты компетентности экспертов на второй итерации; x_j^2 – экспертная оценка важности критерия на второй итерации.

Итерационный расчет коэффициентов компетентности при $t = 3$ представлен в табл. 5.

Таблица 5

Итерационный расчет коэффициентов компетентности экспертов (x_j^3) при $t = 3$

Критерий	x_j^3
Процентное содержание меди ([Cu], %)	$x_1^3 = K_1^2 \cdot x_{11} + K_2^2 \cdot x_{21} + K_3^2 \cdot x_{31} + K_4^2 \cdot x_{41} + K_5^2 \cdot x_{51} + K_6^2 \cdot x_{61} + K_7^2 \cdot x_{71} + K_8^2 \cdot x_{81} + K_9^2 \cdot x_{91} + K_{10}^2 \cdot x_{101} = 0,0665 \cdot 1 + 0,13441 \cdot 1 + 0,1093 \cdot 2 + 0,11226 \cdot 1 + 0,11078 \cdot 2 + 0,08714 \cdot 2 + 0,11226 \cdot 1 + 0,06647 \cdot 1 + 0,11078 \cdot 2 + 0,0901 \cdot 1 = 1,42$
Процентное содержание хрома ([Cr], %)	$x_2^3 = K_1^2 \cdot x_{12} + K_2^2 \cdot x_{22} + K_3^2 \cdot x_{32} + K_4^2 \cdot x_{42} + K_5^2 \cdot x_{52} + K_6^2 \cdot x_{62} + K_7^2 \cdot x_{72} + K_8^2 \cdot x_{82} + K_9^2 \cdot x_{92} + K_{10}^2 \cdot x_{102} = 0,0665 \cdot 1 + 0,13441 \cdot 2 + 0,1093 \cdot 1 + 0,11226 \cdot 2 + 0,11078 \cdot 2 + 0,08714 \cdot 1 + 0,11226 \cdot 2 + 0,06647 \cdot 1 + 0,11078 \cdot 2 + 0,0901 \cdot 2 = 1,67$
Процентное содержание никеля ([Ni], %)	$x_3^3 = K_1^2 \cdot x_{13} + K_2^2 \cdot x_{23} + K_3^2 \cdot x_{33} + K_4^2 \cdot x_{43} + K_5^2 \cdot x_{53} + K_6^2 \cdot x_{63} + K_7^2 \cdot x_{73} + K_8^2 \cdot x_{83} + K_9^2 \cdot x_{93} + K_{10}^2 \cdot x_{103} = 0,0665 \cdot 1 + 0,13441 \cdot 3 + 0,1093 \cdot 2 + 0,11226 \cdot 2 + 0,11078 \cdot 1 + 0,08714 \cdot 1 + 0,11226 \cdot 2 + 0,06647 \cdot 1 + 0,11078 \cdot 1 + 0,0901 \cdot 1 = 1,60$

$$\lambda^3 = 1,42 \sum_{i=1}^{10} x_{i1} + 1,67 \sum_{i=1}^{10} x_{i2} + 1,60 \sum_{i=1}^{10} x_{i3} = 1,42 \cdot 14 + 1,67 \cdot 16 + 1,6 \cdot 15 = 70,62,$$

где λ^3 – показатель для корректировки коэффициента компетентности на третьей итерации; x_j^3 – экспертная оценка важности критерия на третьей итерации.

Итерационный расчет коэффициентов компетентности представлен в табл. 6.

Таблица 6

Итерационный расчет коэффициентов компетентности экспертов (K_i^3) при $t = 3$

Номер эксперта, i	K_i^3
1	$K_1^3 = \frac{1}{70,62}(x_1^3 \cdot x_{11} + x_2^3 \cdot x_{12} + x_3^3 \cdot x_{13}) = \frac{1,42 \cdot 1 + 1,67 \cdot 1 + 1,6 \cdot 1}{70,62} = 0,06642$
2	$K_2^3 = \frac{1}{70,62}(x_1^3 \cdot x_{21} + x_2^3 \cdot x_{22} + x_3^3 \cdot x_{23}) = \frac{1,42 \cdot 1 + 1,67 \cdot 2 + 1,6 \cdot 3}{70,62} = 0,13547$
3	$K_3^3 = \frac{1}{70,62}(x_1^3 \cdot x_{31} + x_2^3 \cdot x_{32} + x_3^3 \cdot x_{33}) = \frac{1,42 \cdot 2 + 1,67 \cdot 1 + 1,6 \cdot 2}{70,62} = 0,10920$
4	$K_4^3 = \frac{1}{70,62}(x_1^3 \cdot x_{41} + x_2^3 \cdot x_{42} + x_3^3 \cdot x_{43}) = \frac{1,42 \cdot 1 + 1,67 \cdot 2 + 1,6 \cdot 2}{70,62} = 0,11278$
5	$K_5^3 = \frac{1}{70,62}(x_1^3 \cdot x_{51} + x_2^3 \cdot x_{52} + x_3^3 \cdot x_{53}) = \frac{1,42 \cdot 2 + 1,67 \cdot 2 + 1,6 \cdot 1}{70,62} = 0,11016$
6	$K_6^3 = \frac{1}{70,62}(x_1^3 \cdot x_{61} + x_2^3 \cdot x_{62} + x_3^3 \cdot x_{63}) = \frac{1,42 \cdot 2 + 1,67 \cdot 1 + 1,6 \cdot 1}{70,62} = 0,08651$
7	$K_7^3 = \frac{1}{70,62}(x_1^3 \cdot x_{71} + x_2^3 \cdot x_{72} + x_3^3 \cdot x_{73}) = \frac{1,42 \cdot 1 + 1,67 \cdot 2 + 1,6 \cdot 2}{70,62} = 0,11278$
8	$K_8^3 = \frac{1}{70,62}(x_1^3 \cdot x_{81} + x_2^3 \cdot x_{82} + x_3^3 \cdot x_{83}) = \frac{1,42 \cdot 1 + 1,67 \cdot 1 + 1,6 \cdot 1}{70,62} = 0,06643$
9	$K_9^3 = \frac{1}{70,62}(x_1^3 \cdot x_{91} + x_2^3 \cdot x_{92} + x_3^3 \cdot x_{93}) = \frac{1,42 \cdot 2 + 1,67 \cdot 2 + 1,6 \cdot 1}{70,62} = 0,11016$
10	$K_{10}^3 = \frac{1}{70,62}(x_1^3 \cdot x_{101} + x_2^3 \cdot x_{102} + x_3^3 \cdot x_{103}) = \frac{1,42 \cdot 1 + 1,67 \cdot 2 + 1,6 \cdot 1}{70,62} = 0,09008$

В таблице введены следующие обозначения: K_i^3 – коэффициенты компетентности экспертов на третьей итерации; x_j^3 – экспертная оценка важности критерия на третьей итерации.

В табл. 7 приведены результаты определения коэффициентов компетентности экспертов на различных уровнях итерации.

Таблица 7

Значения коэффициентов компетентности экспертов

Номер эксперта, i	Номер итерации, t		
	1	2	3
1	0,1	0,06647	0,066428
2	0,1	0,13442	0,135471
3	0,1	0,10931	0,109201
4	0,1	0,11226	0,112777
5	0,1	0,11078	0,110163
6	0,1	0,08715	0,086507

Продолжение таблицы 7

Номер эксперта, <i>i</i>	Номер итерации, <i>t</i>		
	1	2	3
7	0,1	0,11226	0,112777
8	0,1	0,06647	0,066428
9	0,1	0,11078	0,110163
10	0,1	0,09010	0,090084
Сумма	1	1	1

Анализ результатов, полученных с помощью алгоритма Л. Г. Евланова и В. А. Кутузова, показал, что на каждом шаге итерации значения коэффициентов компетентности экспертов отличаются не более чем на 0,1 для первой и второй итераций и не более чем на 0,0001 для второй и третьей итераций. Значения коэффициентов всех экспертов незначительно отличаются друг от друга, что говорит об их равной компетентности, т. е их мнения вносятся с практически равными весовыми коэффициентами.

Выводы

В работе осуществлена формализация и классификация требований к процессу выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи в условиях электросталеплавильного цеха крупного металлургического предприятия для интеллектуализации производственного процесса, обеспечиваемой с помощью эффективного выбора целевых функций в интерактивном конструкторе.

Классификация требований к процессу выплавки стали позволила синтезировать список критериев для математического обеспечения задачи многокритериальной оптимизации формирования структуры шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи.

Задача многокритериальной оптимизации формирования структуры шихтовых материалов формализована с точки зрения теории предпочтения критериев. С этой целью оценки десяти экспертов проранжировали по важности и определили отношения предпочтения критериев.

Оценка компетентности экспертов проводилась с помощью алгоритма, предложенного Л. Г. Евлановым и В. А. Кутузовым; он основан на итеративной процедуре корректировки коэффициентов компетентности. Анализ результатов показал, что значения коэффициентов всех экспертов незначительно отличаются друг от друга, поэтому их мнения вносятся с практически равными весовыми коэффициентами.

Список источников

Евланов Л. Г., Кутузов В. А. Экспертные оценки в управлении. Москва: Экономика, 1978. 133 с.

Логунова О. С., Сибилева Н. С., Павлов В. В. Результаты сравнительного анализа решения многокритериальной задачи оптимизации для расчета структуры шихтовых материалов дуговой сталеплавильной печи // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2014. № 2 (5). С. 54–64.

Логунова О. С., Сибилева Н. С., Павлов В. В. Система интеллектуальной поддержки выбора шихтовых материалов для дуговой сталеплавильной печи: консолидация эмпирической и экспертной информации // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2016. Т. 4, № 2. С. 26–31.

Логунова О. С., Филиппов Е. Г., Павлов В. В., Павлов И. В. Постановка взаимосвязанных задач многокритериальной оптимизации состава шихты для дуговых электросталеплавильных печей // Вестник НТУ «ХПИ». 2012. № 62 (968). С. 121–129.

Павлов В. В., Ивин Ю. А., Пехтерев С. В., Мацко И. И., Логунова О. С. Влияние фракционного состава металлолома на показатели работы дуговой сталеплавильной печи // Электрометаллургия. 2011. № 11. С. 2–6.

Подвесовский А. Г. Методы принятия решений. Методы оптимальных решений. Брянск: БГТУ, 2010. 196 с.

Подиновский В. В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 64 с.

Подиновский В. В., Потапов М. А. Важность критериев в многокритериальных задачах принятия решений: теория, методы, софт и приложения // Открытое образование. 2012. № 2. С. 55–61.

Подиновский В. В., Потапов М. А., Нелюбин А. П., Подиновская О. В. Теория важности критериев: современное состояние и направления дальнейшего ее развития // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. ВСПУ–2014 (г. Москва, 16–19 июня 2014 г.). Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. С. 7697–7702.

Салганик В. М., Полецков П. П., Кухта Ю. Б., Егорова Л. Г. Управление качеством горячекатаного проката по профилю и плоскостности на базе использования автоматизированной системы // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2010. № 1. С. 59–62.

Сибилева Н. С., Логунова О. С. Теория предпочтения и многокритериальность при выборе структуры шихтовых материалов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 76-й международной научно-технической конференции / под редакцией С. В. Пыхтуновой. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2018. Т. 1. С. 241–242.

Соловьев В. И. Методы оптимальных решений. Москва: Финансовый университет, 2012. 364 с.

Торчинский В. Е., Сибилева Н. С., Логунова О. С. Особенности применения генетического алгоритма для оптимизационной задачи о структуре шихтовых материалов дуговой сталеплавильной печи // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3 (40). С. 63–69.

Bai C., Zhang R., Qian L., Wu Y. Comparisons of probabilistic linguistic term sets for multi-criteria decision making // Knowledge-Based Systems. 2017. Vol. 119. P. 284–291. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.12.020>.

Corrales L. C. N., Lambán M. P., Hernandez Korner M. E., Royo J. Overall Equipment Effectiveness: Systematic Literature Review and Overview of Different Approaches // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, iss. 18. URL: https://www.researchgate.net/publication/345031959_Overall_Equipment_Effectiveness_Systematic_Literature_Review_and_Overview_of_Different_Approaches (дата обращения: 15.08.2021).

Logunova O. S., Sibileva N. S. Intelligent Support System of Steel Technical Preparation in an Arc Furnace: Functional Scheme of Interactive Builder of the Multi Objective Optimization Problem // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 287. URL: https://www.researchgate.net/publication/322215964_Intelligent_Support_System_of_Steel_Technical_Preparation_in_an_Arc_Furnace_Functional_Scheme_of_Interactive_Builder_of_the_Multi

Objective_Optimization_Problem (дата обращения: 15.08.2021).

Lu Y.-Z., Chen Y.-W., Chen M.-R., Chen P., Zeng G.-Q. Extremal Optimization: Fundamentals, Algorithms, and Applications. Boca Raton: Auerbach Publications, 2016. 350 p.

Mittal S., Khan M. A., Romero D., Wuest T. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2019. Vol. 233, iss. 5. P. 1342–1361. <https://doi.org/10.1177/0954405417736547>.

Panetto H., Iung B., Ivanov D., Weichhart G., Wang X. Challenges for the Cyber-Physical Manufacturing Enterprises of the Future // Annual Reviews in Control. 2019. Vol. 47. P. 200–213. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.02.002>.

Peng X., Yang Y. Algorithms for interval-valued fuzzy soft sets in stochastic multi-criteria decision making based on regret theory and prospect theory with combined weight // Applied Soft Computing. 2017. Vol. 54. P. 415–430. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.06.036>.

Qian F., Zhong W., Du W. Fundamental Theories and Key Technologies for Smart and Optimal Manufacturing in the Process Industry // Engineering. 2017. Vol. 3, iss. 2. P. 154–160. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.02.011>.

Wang G.-D. Technology innovation and development direction of iron and steel industry // Kang T'ieh / Iron and Steel. 2015. Vol. 50, iss. 9. P. 1–10. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20150319>.

Wei G., Alsaadi F. E., Hayat T., Alsaedi A. A Linear Assignment Method for Multiple Criteria Decision Analysis with Hesitant Fuzzy Sets Based on Fuzzy Measure // International Journal of Fuzzy Systems. 2017. Vol. 19, iss. 3. P. 607–614. <https://doi.org/10.1007/s40815-016-0177-x>.

Wu J.-Z., Beliakov G. Nonmodularity index for capacity identifying with multiple criteria preference information // Information Sciences. 2019. Vol. 492. P. 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.04.025>.

Xie S., Xie Y., Huang T., Gui W. Multiobjective-Based Optimization and Control for Iron Removal Process under Dynamic Environment // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. Vol. 17, iss. 1. P. 569–577. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2975273>.

Yu K., Liang J., Qu B., Yue C. Purpose-directed two-phase multiobjective differential evolution for constrained multiobjective optimization // Swarm and Evolutionary Computation. 2021. Vol. 60. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100799>.

Zanoni S., Ferretti I., Zavanella L. E. Energy savings in reheating furnaces through process modelling // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 42. P. 205–210. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.071>.

References

Evlanov L. G., Kutuzov V. A. *Ekspertnye otsenki v upravlenii* [Expert evaluations in management]. Moscow: Ekonomika, 1978. 133 p.

Logunova O. S., Sibileva N. S., Pavlov V. V. Rezul'taty sravnitel'nogo analiza resheniia mnogokriterial'noi zadachi optimizatsii dlia rascheta struktury shikhtovykh materialov dugovoi staleplavil'noi pechi [The results of comparative analysis of solving multicriteria optimization problems for calculating the structure of charge materials for electric arc furnace]. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie sistem v promyshlennoi i sotsial'noi sferakh* [Software of systems in the industrial and social fields], 2014, no. 2 (5), pp. 54–64.

Logunova O. S., Sibileva N. S., Pavlov V. V. Sistema intellektual'noi podderzhki vybora shikhtovykh materialov dlia dugovoi staleplavil'noi pechi: konsolidatsiia empiricheskoi i ekspertnoi informatsii [Intellectual support system of selection the charge materials for electric arc furnace:

consolidation empirical and expert information]. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie sistem v promyshlennoi i sotsial'noi sferakh* [Software of systems in the industrial and social fields], 2016, vol. 4, no. 2, pp. 26–31.

Logunova O. S., Filippov E. G., Pavlov V. V., Pavlov I. V. Postanovka vzaimosviazannykh zadach mnogokriterial'noi optimizatsii sostava shikhty dlia dugovykh elektrostaleplavil'nykh pechei [Statement of related problems of the charge multiobjective optimization for electric arc furnace]. *Vestnik NTU "KhPI"* [NTU "KhPI" Bulletin], 2012, no. 62 (968), pp. 121–129.

Pavlov V. V., Ivin Iu. A., Pekhterev S. V., Matsko I. I., Logunova O. S. Vliianie fraktsionnogo sostava metalloloma na pokazateli raboty dugovoi staleplavil'noi pechi [Influence of iron charge parameters on engineering-and-economical performance of heavy-load electric furnace work]. *Elektrometallurgii* [Electrometallurgy], 2011, no. 11, pp. 2–6.

Podvesovskii A. G. *Metody priniatiia reshenii. Metody optimal'nykh reshenii* [Decision-making methods. Methods of optimal solutions]. Briansk: BGTU, 2010. 196 p.

Podinovskii V. V. *Vvedenie v teoriyu vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'nykh zadachakh priniatiia reshenii* [Introduction to the criteria importance theory in multicriteria decision-making problems]. Moscow: FIZMATLIT, 2007. 64 p.

Podinovskii V. V., Potapov M. A. Vazhnost' kriteriev v mnogokriterial'nykh zadachakh priniatiia reshenii: teoriia, metody, soft i prilozheniia [Criteria importance in multiple criteria decision-making problems: theory, methods, soft, and applications]. *Otkrytoe obrazovanie* [Open education], 2012, no. 2, pp. 55–61.

Podinovskii V. V., Potapov M. A., Neliubin A. P., Podinovskaia O. V. Teoriia vazhnosti kriteriev: sovremennoe sostoianie i napravleniia dal'neishego ee razvitiia [The theory of the criteria importance: the current state and areas for its further development]. *XII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniia. VSPU–2014 (g. Moskva, 16–19 iunია 2014 g.)* [XII All-Russian meeting on management problems – 2014 (Moscow, June 16–19, 2014)]. Moscow: Institut problem upravleniia im. V. A. Trapeznikova RAN, 2014, pp. 7697–7702.

Salganik V. M., Poletskov P. P., Kukhta Iu. B., Egorova L. G. Upravlenie kachestvom goriachekatanogo prokata po profilu i ploskostnosti na baze ispol'zovaniia avtomatizirovannoi sistemy [Quality management of hot rolled profile and flatness stock based on automated system]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2010, no. 1, pp. 59–62.

Sibileva N. S., Logunova O. S. Teoriia predpochteniia i mnogokriterial'nost' pri vybore struktury shikhtovykh materialov [Preference theory and multicriteriality in choosing the structure of charge materials]. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniia: tezisy dokladov 76-i mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Current problems of modern science, technology and education: Proceedings of the 76th international scientific and technical conference; ed. by S. V. Pykhtunova]. Magnitogorsk: Magnitogorskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. G. I. Nosova, 2018, vol. 1, pp. 241–242.

Solov'ev V. I. *Metody optimal'nykh reshenii* [Methods for optimal solutions]. Moscow: Finansovyi universitet, 2012. 364 p.

Torchinskii V. E., Sibileva N. S., Logunova O. S. Osobennosti primeneniia geneticheskogo algoritma dlia optimizatsionnoi zadachi o strukture shikhtovykh materialov dugovoi staleplavil'noi pechi [Application of genetic algorithm for optimization problem in the structuring of charge materials in an electric arc furnace]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 3 (40), pp. 63–69.

Bai C., Zhang R., Qian L., Wu Y. Comparisons of probabilistic linguistic term sets for multi-criteria decision making. *Knowledge-Based Systems*, 2017, vol. 119, pp. 284–291. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.12.020>.

Corrales L. C. N., Lambán M. P., Hernandez Korner M. E., Royo J. Overall equipment effectiveness: systematic literature review and overview of different approaches. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, iss. 18. Available at: https://www.researchgate.net/publication/345031959_Overall_Equipment_Effectiveness_Systematic_Literature_Review_and_Overview_of_Different_Approaches (accessed: 15.08.2021).

Logunova O. S., Sibileva N. S. Intelligent support system of steel technical preparation in an arc furnace: functional scheme of interactive builder of the multi objective optimization problem. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 287. Available at: https://www.researchgate.net/publication/322215964_Intelligent_Support_System_of_Steel_Technical_Preparation_in_an_Arc_Furnace_Functional_Scheme_of_Interactive_Builder_of_the_Multi_Objective_Optimization_Problem (accessed: 15.08.2021).

Lu Y.-Z., Chen Y.-W., Chen M.-R., Chen P., Zeng G.-Q. *Extremal optimization: Fundamentals, algorithms, and applications*. Boca Raton: Auerbach Publications, 2016. 350 p.

Mittal S., Khan M. A., Romero D., Wuest T. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2019, vol. 233, iss. 5, pp. 1342–1361. <https://doi.org/10.1177/0954405-417736547>.

Panetto H., Iung B., Ivanov D., Weichhart G., Wang X. Challenges for the cyber-physical manufacturing enterprises of the future. *Annual Reviews in Control*, 2019, vol. 47, pp. 200–213. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.02.002>.

Peng X., Yang Y. Algorithms for interval-valued fuzzy soft sets in stochastic multi-criteria decision making based on regret theory and prospect theory with combined weight. *Applied Soft Computing*, 2017, vol. 54, pp. 415–430. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.06.036>.

Qian F., Zhong W., Du W. Fundamental theories and key technologies for smart and optimal manufacturing in the process industry. *Engineering*, 2017, vol. 3, iss. 2, pp. 154–160. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.02.011>.

Wang G.-D. Technology innovation and development direction of iron and steel industry. *Kang T'ieh / Iron and Steel*, 2015, vol. 50, iss. 9, pp. 1–10. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20150319>.

Wei G., Alsaadi F. E., Hayat T., Alsaedi A. A linear assignment method for multiple criteria decision analysis with hesitant fuzzy sets based on fuzzy measure. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2017, vol. 19, iss. 3, pp. 607–614. <https://doi.org/10.1007/s40815-016-0177-x>.

Wu J.-Z., Beliakov G. Nonmodularity index for capacity identifying with multiple criteria preference information. *Information Sciences*, 2019, vol. 492, pp. 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.04.025>.

Xie S., Xie Y., Huang T., Gui W. Multiobjective-based optimization and control for iron removal process under dynamic environment. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, vol. 17, iss. 1, pp. 569–577. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2975273>.

Yu K., Liang J., Qu B., Yue C. Purpose-directed two-phase multiobjective differential evolution for constrained multiobjective optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2021, vol. 60. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100799>.

Zanoni S., Ferretti I., Zavanella L. E. Energy savings in reheating furnaces through process modeling. *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 42, pp. 205–210. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.071>.

Сведения об авторах

Оксана Сергеевна Логунова – доктор технических наук, профессор; <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>, logunova66@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Oksana S. Logunova** – Doctor of Technical Sciences, Professor; <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>, logunova66@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russia).

Наталья Сергеевна Сибилева – старший преподаватель; <https://orcid.org/0000-0001-7242-2622>, natus224@gmail.com, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Natalia S. Sibileva** – Senior lecturer; <https://orcid.org/0000-0001-7242-2622>, natus224@gmail.com, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russia).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.08.2021; одобрена после рецензирования 14.10.2021; принята к публикации 25.10.2021.

The article was submitted 08.08.2021; Approved after reviewing 14.10.2021; Accepted for publication 25.10.2021.