

УДК 622.7.01

DOI 10.17513/snt.39612

ОЦЕНИВАНИЕ ОЖИДАЕМОЙ ВАРИАТИВНОСТИ КАЧЕСТВА ТОВАРНОГО КОНЦЕНТРАТА ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ ГОК ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОБЪЕМА СМЕСИТЕЛЬНОГО БУНКЕРА

¹Иващук О.Д., ²Иващук О.О., ¹Синько А.А., ¹Молостов В.В.

¹ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,
Белгород, e-mail: Info@bsu.edu.ru;

²Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова, Актау, Мангистау,
e-mail: admission@yu.edu.kz

Важность задачи усреднения определяет необходимость разработки методов прогнозной оценки изменения вариативности параметров выходного продукта, которая позволила бы минимизировать капитальные вложения, позволяющие получить требуемый уровень усреднения. Цель работы – выполнение адекватной оценки ожидаемой динамики изменения среднеквадратичного отклонения (СКО) показателя качества товарного концентрата при изменении объема бункера перемешивания с помощью моделирования, позволяющего реализовать двухъярусную модель смешения. На первом этапе исследования оценки эффективности усреднения были проведены с применением стандартных методов: метод расчета скользящего среднего и с использованием модели идеального перемешивания. Проведено компьютерное моделирование прохождения через смеситель произвольного количества партий концентрата, позволившее оценить эффективность усреднения при существующей технологии смешения, а также при планируемом увеличении объема смесителя. На втором этапе проведена корректировка модели перемешивания путем использования двухъярусной разбивки смесителя и выполнена дополнительная оценка эффективности смешивания товарного концентрата в существующих условиях производства и при изменении параметров бункера. С помощью разработанного программного обеспечения (ПО) проведено прогнозирование требуемого объема бункера смешения для достижения желательного значения СКО и совместно с работниками экономического и технического отделов обогатительной фабрики (ОФ) сформированы рекомендации по выбору параметров системы перемешивания для достижения оптимального результата с точки зрения экономической целесообразности.

Ключевые слова: математическое моделирование, оценка эффективности усреднения, среднеквадратичное отклонение, двухъярусная модель

ESTIMATION OF THE EXPECTED VARIABILITY IN THE QUALITY OF THE COMMODITY CONCENTRATE OF THE GOK PROCESSING PLANT WHEN THE VOLUME OF THE MIXING HOPPER CHANGES

¹Ivaschuk O.D., ²Ivaschuk O.O., ¹Sinko A.A., ¹Molostov V.V.

¹Belgorod National Research University, Belgorod, e-mail: Info@bsu.edu.ru;

²Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yessenov, Aktau, Mangistau,
e-mail: admission@yu.edu.kz

The importance of the averaging problem determines the need to develop methods for predictive assessment of changes in the variability of the parameters of the output product, which would allow minimizing capital investments to obtain the required level of averaging. The purpose of the work is to perform an adequate assessment of the expected dynamics of the change in the standard deviation (RMS) of the quality indicator of the commercial concentrate with a change in the volume of the mixing bin using modeling that allows the implementation of a 2-cell mixing model. At the first stage of the study, the evaluation of the averaging efficiency was carried out using standard methods: the method of calculating the moving average and using the ideal mixing model. Computer simulation of the passage of an arbitrary number of batches of concentrate through the mixer was carried out, which made it possible to evaluate the efficiency of averaging with the existing mixing technology, as well as with the planned increase in the volume of the mixer. At the second stage, the mixing model was corrected by using a 2-cell breakdown of the mixer and an additional assessment was made of the efficiency of mixing the commercial concentrate under existing production conditions and when changing the parameters of the bunker. With the help of the developed software, the required volume of the mixing hopper was predicted to achieve the desired RMS value, and together with the employees of the economic and technical departments of the processing plant (OP), recommendations were made on choosing the parameters of the mixing system to achieve the optimal result from the point of view of economic feasibility.

Keywords: mathematical modeling, evaluation of averaging efficiency, standard deviation, 2-cell model

Значительное снижение производительности плавильных печей, работающих на неусредненном сырье, а также снижение степени извлечения ценных компонентов в процессе переработки являются основными предпосылками к усреднению качества добываемой руды и товарного концентрата [1–3], цель которого – вырав-

нивание их химического и гранулометрического состава.

С точки зрения развития теории усреднения можно выделить работы [4, 5], в которых предложена информационная система, цель которой – формирование эффективной технологической схемы усреднения подаваемой на обогащение руды.

С использованием имитационного моделирования создан модуль «усреднительный склад», формирующий рекомендации по оптимальной работе усреднительного склада [6–8]. Недостатком данной модели является то, что она отражает свойства только складов отвального типа в карьерах с использованием автомобильно-железнодорожного транспорта [9, 10].

Интерес с позиции задачи усреднения представляет работа [10], в которой предложено повышение эффективности процесса на основе модели оптимизации затрат, реализованной в многофакторной системе поддержки принятия решений, требующей наличия большого количества дорогостоящего оборудования для постоянного контроля и изменения производственных параметров, т.е. серьезных финансовых ресурсов.

Методику оценки снижения вариативности показателей руды и товарного концентрата достаточно полно описывают авторы [11], излагая теоретические основы усреднения на горно-обогатительных комбинатах и методы оценки его эффективности на основе использования корреляционных функций потоков продукта. Несмотря на существенный объем теоретических выкладок и расчетов, изложенные рекомендации не представляют собой полноценный инструмент для практических расчетов эффективности усреднения в случае изменившихся условий, что обусловлено приближенным характером расчетных формул и функций взаимосвязи потоков.

В целом можно сделать вывод, что в специальной литературе задача оценки эффективности усреднения описана достаточно слабо, приведенные авторами решения имеют узкую направленность и выполнены с использованием зачастую необоснованных приближений, а применение описанных методов затруднительно в связи с невозможностью точного определения корреляционных функций в обычных производственных условиях.

Важность задачи усреднения определяет необходимость разработки методов прогнозной оценки изменения вариативности параметров выходного продукта, которая позволила бы минимизировать капитальные вложения, необходимые для получения требуемого уровня усреднения.

Материалы и методы исследования

Исследование производилось с использованием статистических методов исследования в прикладном пакете анализа данных STATISTICA и математического моделирования на основе модели идеального смешения и двухъячеечной модели перемешивания, реализованного в среде Matlab.

Оценка снижения вариативности показателя объемной доли содержания железа ($Fe_{\text{общ}}$) стандартными методами

Оценка эффективности усреднения проводилась с использованием производственных данных обогатительной фабрики Старооскольского горно-обогатительного комбината (ГОК), полученных в 2022 г., содержащих объемы поступающих в смеситель партий концентрата, средние значения показателя их качества – объемной доли содержания в них железа $Fe_{\text{общ}}$.

Для оценки уменьшения вариативности показателя в результате смешения был использован метод скользящего среднего. На первом шаге определялось средневзвешенное значение $Fe_{\text{общ}}$ с учетом объемов имеющейся в бункере партии и вновь поступившей. Следующее скользящее среднее рассчитывалось с учетом этого среднего значения, для возможности учета «средневзвешенности» объем партии, находящейся в бункере, брался как средний между двумя предыдущими партиями. В результате было определено, что стандартное отклонение показателя $Fe_{\text{общ}}$ в результате смешения снизилось в среднем с 0,25 до 0,2, а стандартная ошибка с 0,0180 до 0,0152.

Далее исследование проводилось в предположении, что объем смесителя будет увеличен втрое (изначально планируемый на предприятии), что позволяет смешивать фактически три партии продукта, а поступающей партии «вытеснить» только примерно треть объема находящейся в смесителе массы. На первом шаге рассчитывалось средневзвешенное значение $Fe_{\text{общ}}$ для первых трех поступающих в бункер партий. Далее, с учетом полученного значения определялось скользящее средневзвешенное, при этом в качестве объема находящейся в бункере партии бралось 2/3 ее суммарного объема. В результате были определены ожидаемые снижения диапазонов колебаний текущего значения $Fe_{\text{общ}}$ и его среднего за месяц, которые представлены в табл. 1.

Оценивание эффективности усреднения товарного концентрата на основе модели идеального перемешивания и ее реализация в виде независимого приложения

Для проверки точности проведенного прогноза база производственных данных должна быть расширена за счет включения в нее значений $Fe_{\text{общ}}$ товарного концентрата на выходе из бункера перемешивания, что в условиях реального производства затруднительно.

Таблица 1

Прогнозируемое изменение СКО и стандартной ошибки при изменении объема смесителя

Статистический показатель	Абсолютное изменение	Относительное изменение, %
Стандартная ошибка	0,0017	12,40
Стандартное отклонение (СКО)	0,0238	12,40

С другой стороны, организованная таким образом проверка позволила бы оценить точность прогноза только после проведения модернизационных мероприятий. По этой причине возникла необходимость разработки дополнительной прогнозной модели, с помощью которой можно было бы верифицировать надежность формируемого прогноза или провести его корректировку.

Построение новой прогнозной системы проводилось с использованием модели идеального перемешивания, предполагающей, что поступающая партия вещества сразу распространяется по всему объему смесителя и появляется в выходящей из бункера массе. При условиях, что объем твердого вещества и объемный расход твердого вещества в смесителе постоянны, значение контролируемого показателя на выходе из смесителя равно его значению в аппарате и в смесителе выполняются условия квазистационарности, математическая модель

аппарата идеального перемешивания была представлена в виде

$$t_{cp} \frac{d}{dt} (C_{вых}(t)) + C_{вых}(t) = C_{вх}(t), \quad (1)$$

где $t_{cp} = Vr / v$ – среднее время пребывания смешиваемой массы в аппарате, t – текущее время; $C_{вх}(t)$ и $C_{вых}(t)$ – концентрации на входе и выходе, v – объемный расход смеси, Vr – объем аппарата в м³.

Так как на обогатительной фабрике каждые четыре часа в смесительный бункер поступает следующая партия, в качестве внешнего воздействия для анализа поведения объекта можно использовать ступенчатое $C_{вх}(t) = A = const$. Однако составить единое дифференциальное уравнение невозможно, поскольку меняется не только значение концентрации параметра качества, но и объем партии и фактически возникает задача решения последовательности дифференциальных уравнений

$$t_{cp1} \frac{d}{dt} (C_{вых,1}(t)) + C_{вых,1}(t) = C_{вх,1}(t), \quad C_{вых,1}(t=0) = C_{начальное},$$

$$t_{cp2} \frac{d}{dt} (C_{вых,2}(t)) + C_{вых,2}(t) = C_{вх,2}(t), \quad C_{вых,2}(t=0) = C_{вых,1}(t = t_{конеч}),$$

...

$$t_{cp,n} \frac{d}{dt} (C_{вых,n}(t)) + C_{вых,n}(t) = C_{вх,n}(t), \quad C_{вых,n}(t=0) = C_{вых,n-1}(t = t_{конеч}),$$

при этом начальными условиями (НУ) уравнений, определяющих концентрацию на выходе из аппарата, при поступлении в него i -й партии концентрата будут значения концентрации $Fe_{общ}$, которые достигнуты в нем в момент завершения поступления в него предыдущей партии, т.е.

$$C_{вых,i}(t=0) = C_{вых,i-1}(t = t_{конеч}). \quad (3)$$

С учетом того, что каждая партия поступает в бункер в течение четырех часов, сред-

нее время нахождения смешиваемой массы, состоящей из i -й партии в смесителе, также будет различным и будет определяться как

$$t_{cp,n} = 4 \frac{V_{смесителя}}{V_{n-ной\ партии}}. \quad (4)$$

С учетом НУ, концентрация параметра $Fe_{общ}$, в момент t при поступлении n -й партии будет определяться следующим выражением:

$$C_{\text{вых},n}(t) = C_{\text{вых},n-1}(t = t_{\text{конеч}}) + (C_n - C_{\text{вых},n-1}(t = t_{\text{конеч}})) \cdot e^{-\frac{t}{t_{\text{сп}}}}, \quad (5)$$

где C_n – концентрация $Fe_{\text{общ}}$ в поступающей в смесительный бункер n -й партии, а $t_{\text{конеч}} = 4$. Для получения массива значений показателя $Fe_{\text{общ}}$ в выходящей из смесителя смеси после прохождения через него n партий концентрата целесообразно использовать численные методы решения. С этой целью в пакете Matlab была составлена программа, с помощью которой решалась система (2) с использованием алгоритма повышенной точности, формировался массив выходных значений концентрации показателя качества с дискретизацией 1/10 часа и рассчитывались его основные статистические характеристики.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

Расчетные значения среднеквадратичного отклонения, выполненные с помощью модели идеального перемешивания, выше, чем значения, полученные путем моделирования перемешивания средневзвешенным скользящим средним:

В среднем на 20% – для существующей схемы смешения.

В среднем на 10% – для схемы, планируемой к внедрению.

Абсолютное изменение (уменьшение) СКО при переходе с существующей на планируемую схему, оцененное с помощью модели идеального перемешивания, выше в среднем в два раза.

Полученные с помощью разработанного программного обеспечения значения СКО более близки к реальным, чем полученные стандартным методом, поскольку используемая в нем модель точнее отражает фактический характер перемешивания.

Оценивание эффективности усреднения товарного концентрата на основе двухъячеечной модели перемешивания и ее реализация в виде независимого приложения

Учитывая, что модель идеального смешения наиболее приемлема для аппаратов небольших размеров с соизмеримыми высотой и диаметром, разработанная схема расчета СКО будет давать более точные прогнозы для существующей схемы смешения, а для проведения прогнозной оценки СКО модернизированной схемы с увеличенным в разы бункером перемешивания необходима дополнительная корректировка модели.

С этой целью была использована ячеечная модель, основанная на предположении об идеальном перемешивании в пределах

ячеек и состоящая из более сложной последовательности дифференциальных уравнений, учитывающих, что выходное значение концентрации параметра качества в каждый фиксированный момент времени из первой ячейки является входным значением для второй, при этом начальное значение концентрации во второй ячейке равно значению концентрации при окончании поступления в нее предыдущей «подпартии» из первой ячейки. С учетом этого составлена модель, позволяющая получить массив выходных значений концентрации (через интервал времени 1/40 от среднего времени пребывания партии) первой ячейки смесителя, для каждого из которых определялись 40 значений выходной концентрации из второй ячейки.

Из производственных данных были известны массы поступающих партий m_j , плотность концентрата ρ и значения средней концентрации в партии C_j . Среднее время пребывания партии в ячейки при условии, что объем бункера V_b неизменный, определялся как

$$t_{\text{сп},n} = \frac{V_b}{2} \cdot \rho \cdot m_n. \quad (6)$$

В качестве решения дифференциального уравнения

$$\frac{d}{dt}(C_{\text{вых},n}(t)) = \frac{1}{t_{\text{сп},n}}(C_{\text{вх},n} - C_{\text{вых},n}(t));$$

$$C_{\text{вых},n}(t=0) = C_{\text{вых},n-1}(t = t_{\text{конеч}}) \quad (7)$$

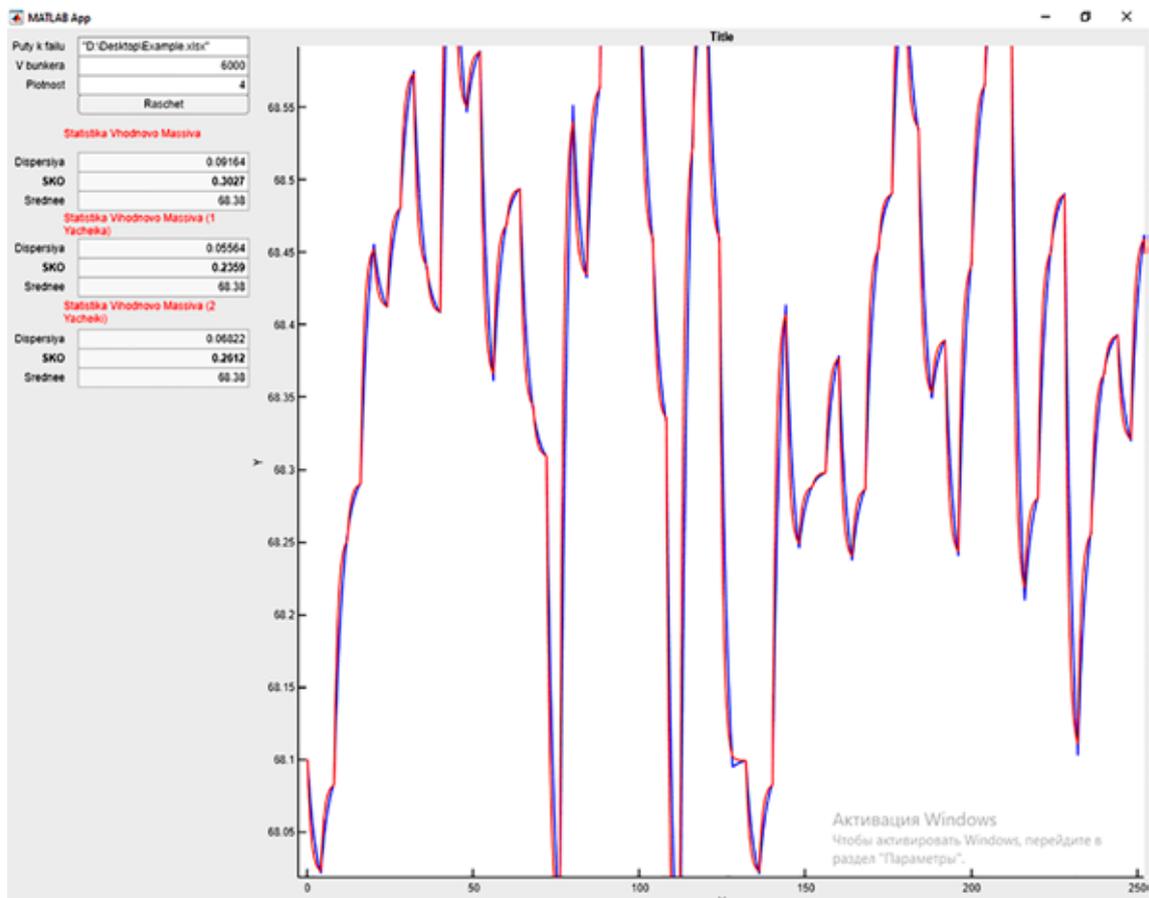
с помощью численных методов брался массив из 40 значений $\widetilde{C}_{n,i}$, определяющих значения концентрации на входе во вторую ячейку. Далее для каждой из $C_{n,i}$ решалось уравнение

$$\frac{d}{dt}(C_{\text{вых},n,i}(t)) = \frac{1}{t_{\text{сп},n,i}}(\widetilde{C}_{n,i} - C_{\text{вых},n,i}(t));$$

$$C_{\text{вых},n,i}(t=0) = C_{\text{вых},n,i-1}(t = t_{\text{конеч}}). \quad (8)$$

В результате получали массив выходных значений концентрации на выходе из второй ячейки.

Для возможности решения такой последовательности дифференциальных уравнений в прикладном пакете Matlab было сформировано независимое приложение, интерфейс и результаты работы которого приведены на рисунке.



Интерфейс ПО, позволяющего получить массив значений параметра качества выходящей из смесителя массы после перемешивания произвольного количества партий с помощью модели идеального перемешивания и ячейечной модели

Таблица 2

Сравнение оценок СКО для существующей и планируемой к внедрению схем перемешивания, проведенных с использованием моделей идеального перемешивания и двухъячейечной модели

Характеристики	СКО входного массива данных (до перемешивания)	Существующая схема перемешивания	Планируемая схема перемешивания	Абсолютное изменение СКО	Относительное изменение СКО, %
Январь (185 партий)					
СКО по стандартному методу	0,32	0,238	0,215	-0,022	-9,4
СКО по модели идеального перемешивания		0,285	0,236	-0,049	-17,2
СКО по двухъячейечной модели		0,292	0,261	-0,031	-10,6
Февраль (175 партий)					
СКО по стандартному методу	0,265	0,198	0,169	-0,029	-14,7
СКО по модели идеального перемешивания		0,246	0,188	-0,058	-23,6
СКО по двухъячейечной модели		0,263	0,223	-0,040	-15,2

Анализ приведенных в табл. 2 данных позволяет сделать следующие выводы.

С помощью данного ПО были проведены дополнительные оценки прогнозного значения СКО в смесителе, приведенные в табл. 2.

Расчетные значения среднеквадратичного отклонения, выполненные с помощью двухъячеечной модели идеального перемешивания, выше, чем значения, полученные путем моделирования перемешивания с использованием модели идеального смешения.

В среднем на 6% – для существующей схемы смешения.

В среднем на 15% – для схемы, планируемой к внедрению.

Абсолютное изменение (уменьшение) СКО при переходе с существующей на планируемую схему, оцененное с помощью двухъячеечной модели, меньше в среднем на 32%.

Учитывая, что ячеечная модель более точно отражает реальный характер процесса перемешивания, полученные с ее помощью данные будут более близки к реальным значениям СКО показателя качества в результирующей смеси.

Заключение

В результате проведенного исследования разработано ПО, позволяющее адекватно оценить уменьшение среднеквадратичного отклонения показателя качества товарного концентрата после его усреднения в бункере перемешивания и провести моделирование, что позволило сформировать рекомендации по оптимизации параметров процесса усреднения. В процессе исследования решены следующие задачи:

– С применением стандартных методов проведены оценки эффективности усреднения существующей в настоящее время и планируемой к внедрению технологиями.

– С использованием модели идеального перемешивания составлена схема оценки изменения вариации показателя качества после прохождения через бункер смешения произвольного количества партий концентрата.

– Разработано независимое приложение, реализующее обработку данных по разработанной схеме, с применением компьютерного моделирования проведено оценивание эффективности усреднения существующей и модернизированной технологий.

– Проведена корректировка модели перемешивания путем использования двухъячеечной разбивки смесителя и про-

ведена дополнительная оценка эффективности смешивания товарного концентрата с использованием скорректированной модели.

– С помощью разработанного ПО проведено прогнозирование требуемого объема бункера смешения для достижения желаемого значения СКО и сформированы рекомендации по выбору параметров системы перемешивания для достижения оптимального результата с точки зрения экономической целесообразности.

Достоверность полученных результатов подтверждена комплексностью проведенных исследований, включающих применение принципов системного анализа, использованием апробированных методов математического и компьютерного моделирования.

Список литературы

1. Юсфин Ю.С., Малышева Т.Я., Плотноков С.В. Критерии качества железорудных окатышей из концентратов руд магнетитовых кварцитов // Известия вузов. Черная металлургия. 2009. № 5. С. 7–10.
2. Holappa L., Taskinen P. Process innovations and sustainability in Finnish metallurgical industries // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2017. No. 126. P. 70–80.
3. Кузнецов А.Л., Смолин С.Ю., Смирных К.В., Бычкова Н.С., Вяткин А.А., Калугин Я.И. Технологии и оборудование публичного акционерного общества (ПАО) «Уралмашзавод» для фабрик окисления металлургического сырья в 21 веке // Сталь. 2018. № 7. С. 2–3.
4. Пихтовников А.Г., Косолапов А.И., Вашлаев И.И. Оценка эффективности межзайного усреднения и его влияния на минимальный объем усреднительного склада с учетом требований к качеству руды // Фундаментальные исследования. 2005. № 2. С. 98–99.
5. Бильфельд Н.В., Пеяс Д.В., Шнабская А.К. Исследование возможности управления усреднением руды методами классической теории управления // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. № 3. С. 123–129.
6. Шевелев В.А. Определение эффективности усреднения руды на буферно-усреднительных складах // Записки Горного института. 2013. № 207. С. 87–89.
7. Липницкий Н.А., Огородников Р.Г., Устинова Я.В. Создание имитационной модели работы подземных усреднительных складов руды рудника сложноструктурных соляных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 1. С. 142–158.
8. Холодняков Г.А., Ипатова А.О., Иконников Д.А., Аргимбаев К.Р. Технологические схемы усреднения руды при циклично-поточной технологии открытых горных работ // Записки Горного института. 2012. № 195. С. 142.
9. Стаценко Л.Г., Брановец Н.Е. Разработка модуля «Усреднительный склад» информационной системы стабилизации качества полезного ископаемого в карьере // Вестник МГТУ им. Н.В. Носова. 2014. № 2. С. 5–10.
10. Sharma D., Kumar S. Knowledge Based Decision Support System in Steel Industries // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2021. No 1116. P. 012083.
11. Adeleke A.A. Mineral Processing Technology: A Concise Introduction // CRC Press. 2023. P. 312.