

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 66.012.25

EDN: GEUWWK

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-3-399-411



Разработка программного обеспечения для балансовых расчётов переработки ильменитовых концентратов

Т.Р. Косовцева¹, Е.В. Сизякова², В.А. Слободин^{3✉}¹⁻³Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Резюме: Цель – разработка специализированного программного обеспечения для автоматизации расчётов балансов материальных потоков в технологической схеме переработки ильменитового концентрата с целью оптимизации производства титана, снижения потерь сырья и повышения эффективности управления процессами. Применен метод анализа материальных потоков для комплексного контроля движения материалов на всех стадиях переработки титансодержащего сырья: восстановительной плавки, хлорирования шлака в расплаве, выделения и очистки тетрахлорида титана, магнитермического восстановления металла и вакуумной сепарации. Разработан программный комплекс на языке Python, состоящий из четырех модулей, каждый из которых рассчитывает материальный баланс для конкретной технологической стадии. Взаимодействие с пользователем реализовано через MS Excel для удобства ввода данных и визуализации результатов. Программный комплекс обеспечил расчет полных материальных балансов с отклонением менее 0,2%. Анализ выявил потери титана техногенного характера на уровне 21,4% от исходного количества металла в концентрате. Показано, что наибольшие потери Ti приходятся на стадиях восстановительной плавки (6,63%, в основном в пыль и чугун) и очистки тетрахлорида титана (IV) (12,92%, в побочные продукты). Меньшие потери зафиксированы при хлорировании шлака (0,33%), восстановлении тетрахлорида титана (IV) (2,50%) и сепарации реакционной массы (0,51%). Разработанные программы опубликованы в официальном бюллетене Роспатента «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топология интегральных микросхем». Разработанный комплекс программ позволяет автоматизировать расчет материальных балансов в производстве титана из ильменитового концентрата. Ключевые направления совершенствования технологической цепочки – модернизация стадий восстановительной плавки и очистки тетрахлорида титана, где наблюдаются максимальные потери целевого металла.

Ключевые слова: титан, разработка программного обеспечения, анализ материальных потоков, ильменитовые концентраты, титановый шлак, стратегические ресурсы, хлорирование, системы планирования ресурсов (ERP).

Для цитирования: Косовцева Т.Р., Сизякова Е.В., Слободин В.А. Разработка программного обеспечения для балансовых расчётов переработки ильменитовых концентратов // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 399–411. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-399-411>. EDN: GEUWWK.

METALLURGY

Original article

Software development for balance calculations of ilmenite concentrate processing

Tatiana R. Kosovtseva¹, Ekaterina V. Sizyakova², Viktor A. Slobodin^{3✉}¹⁻³Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The aim is to develop dedicated software for automating the calculation of material flow balances in the process flow diagram of ilmenite concentrate processing in order to optimize titanium production, reduce raw material losses, and enhance the efficiency of process management. Material flow analysis is used to comprehensively monitor materials flow at all stages of titanium-containing raw material processing. The stages include reduction smelting, slag chlorination in the melt, titanium tetrachloride extraction and purification, magnesiothermic metal reduction, and vacuum separation. The software package developed in Python consists of four modules. Each module calculates the material balance for a specific technological process stage. Interaction with the user is implemented through MS Excel for the convenience of data entry and visualization of results. The software package ensured the calculation of complete material balances with a deviation of less than 0.2%. The analysis revealed technology-related titanium losses at the level of 21.4% compared to the initial amount of metal in the concentrate. It was shown that the most substantial Ti

losses occurred at the stages of reduction smelting (6.63%, mainly into dust and cast iron) and titanium tetrachloride (IV) purification (12.92%, into by-products). Smaller losses were recorded during slag chlorination (0.33%), titanium tetrachloride (IV) reduction (2.50%), and reaction mass separation (0.51%). The designed programs were published in the official Rospatent Bulletin Computer Programs. Databases. Topology of Integrated Circuits. The developed software package enables the automation of material balance calculations in titanium production from ilmenite concentrate. The key areas for improving the technological process include modernizing the reduction smelting and titanium tetrachloride purification stages where maximum losses of the target metal are observed.

Keywords: titan, software development, material flow analysis, ilmenite concentrates, titanium slag, strategic resources, chlorination, Enterprise Resource Planning (ERP) systems

For citation: Kosovtseva T.R., Sizyakova E.V., Slobodin V.A. Software development for balance calculations of ilmenite concentrate processing. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):399-411. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-399-411>. EDN: GEUWKK.

ВВЕДЕНИЕ

Титан является стратегическим и геополитическим ресурсом [1, 2], а также одним из наиболее важных металлов в современном мире, находя широкое применение в различных отраслях промышленности. Его уникальные свойства, такие как высокая удельная прочность, низкая плотность, устойчивость к коррозии и способность выдерживать экстремальные температуры, делают его незаменимым материалом в аэрокосмической, судостроительной, автомобильной, медицинской и химической промышленности [3, 4].

Прогноз показывает, что растущий спрос на титан и повышенное внимание к экологически чистым продуктам будут стимулировать рост рынка в ближайшие годы. Россия, обладая значительными ресурсами и мощной производственной базой, находится в

выгодном положении для удовлетворения этого спроса. Инвестиции в модернизацию производств, внедрение новых технологий переработки ильменитового концентрата и совершенствование управления материальными потоками в технологических цепочках способствуют повышению эффективности производства и укреплению позиции России на мировом рынке титана.

Сырьевая база титана России имеет достаточные масштабы для обеспечения внутренних потребностей страны в титановом сырье (рис. 2). Однако качество и состав песков россыпей и руд коренных месторождений создают дополнительные сложности их переработки, что, в свою очередь, требует использования новых передовых технологий и реализации всех получаемых продуктов⁴ [5].

Котировки титана, \$/, кг



Рис. 1. График изменения цен на титан на мировом рынке
Fig. 1. Titanium price chart on the world market

⁴О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов России в 2020 году. Государственный доклад. М.: Мин-во природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Режим доступа: <https://www.rosnedra.gov.ru/article/13930.html> (дата обращения: 25.04.2025).



Рис. 2. Распределение запасов титана и его месторождений [4]

Fig. 2. Distribution of titanium reserves and its deposits [4]

Основным сырьем для производства титана служит ильменитовый концентрат (табл. 1) [6–10]. Процесс переработки ильменита в металлический титан является сложным и многостадийным, включающим этапы плавки концентрата, хлорирования, восстановления тетрахлорида титана (IV) и получения губчатого титана [11–13]. Каждая из этих стадий требует точного контроля и управления материальными потоками для обеспечения эффективности и устойчивости производственного процесса, как и в случаях применения такого подхода в других отраслях металлургии [14, 15].

Эффективное управление материальными потоками в технологической цепочке переработки ильменитового концентрата играет решающую роль в снижении производственных затрат, повышении качества продукции и сокращении времени цикла

производства. Это включает в себя оптимизацию запасов сырья и готовой продукции, сокращение времени простоя оборудования, улучшение планирования производства и логистики [16].

В последние годы наблюдается увеличение внимания к внедрению современных информационных и управлеченческих технологий в металлургической промышленности. Такие концепции, как цифровизация производства, применение систем управления ресурсами предприятия (от англ. Enterprise Resource Planning – ERP) и внедрение методов бережливого производства становятся все более актуальными [17–20]. Они позволяют предприятиям оптимизировать различные этапы производственного процесса, улучшить обмен информацией между различными подразделениями и этапами производства и принять более обоснованные

Таблица 1. Химический состав ильменитового концентрата, %

Table 1. Chemical composition of ilmenite concentrate, wt%

Соединение	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	V ₂ O ₅
Содержание	50,6	36,2	7,9	1,9	1,6	0,7	0,7	0,2	0,2

решения для повышения эффективности на основе аналитических данных [21–24].

Однако внедрение этих технологий в сфере переработки ильменитового концентрата сталкивается с рядом трудностей, включающих необходимость значительных инвестиций в инфраструктуру, обучение персонала, адаптацию существующих процессов и обеспечение на предприятии совместимости различных систем (система диспетчерского контроля и сбора данных, от англ. Supervisory Control and Data Acquisition SCADA, ERP, система управления производственными процессами, от англ. Manufacturing Execution System MES и т.д.) [25–27]. Кроме того, специфические особенности технологических процессов переработки ильменита требуют разработки специализированных решений, учитывающих химико-металлургические аспекты производства [28–31].

МЕТОДЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ

Из всех методов учета и анализа материальных потоков метод Material Flow Analysis (MFA) выделяется своей способностью к комплексному и детализированному анализу материальных потоков в сложных технологических цепочках. MFA активно используется в таких сферах, как управление ресурсами, экологический менеджмент и региональное управление материалами, а в металлургии он зарекомендовал себя как эффективный инструмент для анализа и оптимизации технологического процесса на различных уровнях – от локальных производств до масштабов отрасли [32, 33].

При переработке ильменитового концентрата для производства титана метод MFA обеспечивает комплексный контроль и управление материальными потоками на каждом этапе технологической схемы. Процесс включает несколько последовательных операций, таких как восстановительная плавка, хлорирование титанового шлака в расплаве, очистка тетрахлорида титана (IV), магниево-термическое восстановление и вакуумная сепарация [9, 10, 34, 35]. На каждом этапе происходит перераспределение материалов, и MFA позволяет точно рассчитывать их балансы, выявлять узкие места и материальные потери, а также определять направления для совершенствования процесса переработки ильменитового концентрата.

Применение MFA решает несколько ключевых задач:

- точный расчет материальных балансов на каждом этапе, обеспечивая информацию о движении элементов (титан, железо, магний и ванадий);
- идентификацию «узких мест», где наблюдаются наибольшие потери материала, например, на стадии очистки тетрахлорида титана (IV), что позволяет целенаправленно совершенствовать условия процесса для минимизации потерь и повышения извлечения титана.

В дополнение к MFA применяются методы математического моделирования, которые позволяют учитывать вариации состава ильменитового концентрата и реагентов (пековый кокс, магний, отработанный электролит и другие), а также изменяющиеся условия (массы загрузки, марку производимого губчатого титана) технологического процесса.

Визуализация данных с использованием диаграмм, графиков и таблиц является важной частью MFA, так как значительно облегчает интерпретацию результатов и помогает быстро выявлять узкие места. Такой подход делает процесс управления материальными потоками более прозрачным и предсказуемым, позволяя оперативно принимать операционные меры, снижающие техногенное рассеивание ценных компонентов, подкрепленные аналитическими данными.

Для реализации метода MFA в технологии переработки ильменитового концентрата требуется создание специализированного программного продукта, который бы интегрировал функции расчета материальных балансов, моделирования и визуализации. Такой программный продукт может состоять из нескольких модулей, каждый из которых решает конкретные задачи: моделирование материальных потоков, расчет параметров в зависимости от технологических условий, создание диаграмм и таблиц для наглядного представления данных. Разработка такого продукта позволит автоматизировать расчеты, ускорить обработку данных и повысить точность анализа, что, в свою очередь, снижает затраты на анализ потерь в производственном процессе и упростит принятие решений для оптимизации стадий технологической схемы переработки.

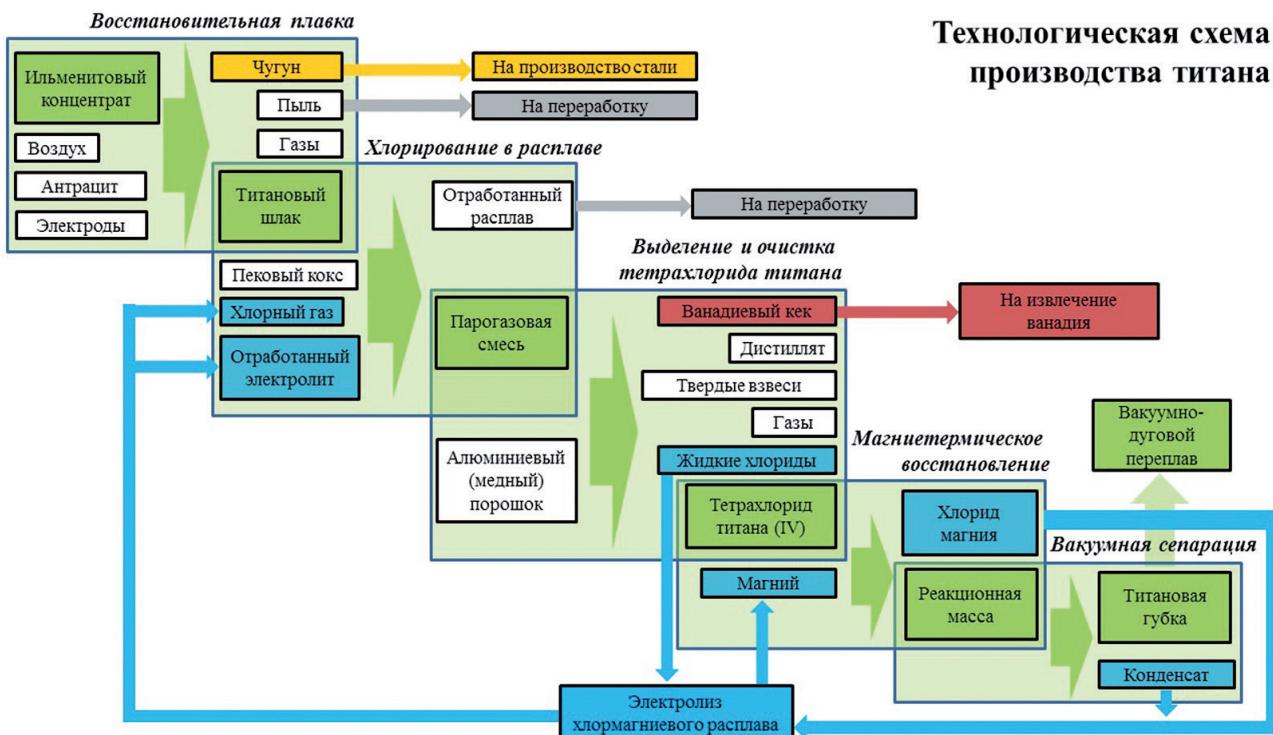


Рис. 3. Диаграмма материальных потоков переработки ильменитового концентрата
 Fig. 3. Diagram of material flows of ilmenite concentrate processing

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа материальных потоков для технологической схемы переработки ильменитового концентрата демонстрируют распределение материалов на каждом этапе (рис. 3).

Для анализа материальных потоков в цепочке переработки ильменитового концентрата было сделано допущение, что стадия выделения из парогазовой смеси тетрахлорида титана (IV) и его очистки – один процесс, хотя она включает в себя несколько операций: удаление твердых примесей, конденсацию, осаждение ванадия, ректификацию, дистилляцию.

Для автоматизации процесса учета и анализа материальных потоков технологической схемы переработки ильменитового концентрата разработан программный

комплекс на основе метода анализа материальных потоков, охватывающий пять ключевых технологических стадий процесса переработки титансодержащего сырья. В состав комплекса входят следующие модули: «Программа расчета материального баланса процесса выплавки титанового шлака» (Программа 1), «Программа расчета материального баланса процесса хлорирования титанового шлака в расплаве» (Программа 2), «Программа расчета материального баланса процесса выделения и очистки тетрахлорида титана из парогазовой смеси» (Программа 3), «Программа расчета материального баланса процесса магниетермического восстановления титана» и «Программа расчета материального баланса процесса вакуумной сепарации реакционной массы» (Программа 4)⁵⁻⁸.

⁵Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681162, Российская Федерация. Программа для расчета материального баланса процесса выплавки титановых шлаков / В.А. Слободин, В.Ю. Бажин, Т.Р. Косовцева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». Заявка № 2023669625, заявл. 26.09.2023; опубл. 11.10.2023.

⁶Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683363, Российской Федерации. Программа для расчета материального баланса процесса хлорирования титанового шлака в расплаве / В.А. Слободин, В.Ю. Бажин, Е.В. Сизякова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». Заявка № 2023681929, заявл. 24.10.2023; опубл. 07.11.2023.

Каждый модуль комплекса реализует точные расчеты материальных балансов, учитывая движение химических элементов на каждом этапе переработки. Это позволяет моделировать разные варианты переработки, прогнозировать распределение различных целевых и побочных компонентов, а также анализировать эффективность каждого передела. Ввод констант используется для уточнения молярных масс, данных технологической практики и других параметров, используемых в расчетах.

Комплекс программ реализован в среде Python, что обеспечивает гибкость и масштабируемость, необходимую для сложных расчетов и интеграции данных. Для удобства ввода и вывода данных используется табличный процессор MS Excel, который обеспечивает простоту в обработке и визуализации результатов. На рис. 4 представлен укрупненный алгоритм решения, демонстрирующий последовательность расчетов и логику взаимодействия программных модулей для комплексного анализа процесса переработки титансодержащего сырья⁵⁻⁸.

Данный комплекс программ является инструментом для научного моделирования и оптимизации процесса, позволяя исследовать влияние различных технологических параметров на материальные потоки и определять направления для повышения эффективности и устойчивости производства.

Для проведения тестовых расчетов использованы данные по составу реагентов и продуктов технологии получения титановой губки из литературных источников [9, 10]. Выходными данными являются таблицы полных материальных балансов процессов переработки ильменитового концентрата; таблицы и диаграммы (рис. 5), характеризующие составы продуктов для каждого из переделов технологической схемы. В частности, для этапа восстановительной плавки помимо состава

концентрата и его массы при расчете учитывается расход электродов, состав восстановителя и его золы, соотношение Ti_2O_3/TiO_2 в шлаке.

В результате выполненных расчетов отклонение в балансах составило менее 0,2%. Программа 4 выводит таблицу (табл. 2) и круговую диаграмму структуры потерь по технологической цепи.

В ходе анализа полученных данных было установлено, что из общей массы титана из ильменитового концентрата, поступающего на плавку, в общем теряется порядка 6,6%, из них 2,5% – в пыль, 1,8% переходят в чугун. В процессе хлорирования титанового шлака в расплаве в парогазовую смесь переходят 99,7% целевого металла, но на стадии выделения и очистки тетрахлорида титана (IV) около 12,9% переходят в побочные продукты (твердые взвеси, дистиллят, ванадиевый кек). Объяснением полученных таких данных является то, что стадия содержит несколько операций для доведения чистоты $TiCl_4$ до 99,99%, что обуславливает переход некоторой части соединений титана ($TiCl_4$, $TiCl_3$, $TiOCl_2$) в оборотные или выводимые из технологии продукты, например, ванадиевый кек, твердые взвеси и другие. На переделах магниевтермического восстановления и вакуумной сепарации теряется порядка 2,5 и 0,5% титана соответственно. Итого по всей технологии потери титана составляют около 21,4%.

Анализ результатов моделирования выявил ключевые проблемы технологии, такие как высокая ресурсоемкость, низкая эффективность использования материальных ресурсов и недостаточная оптимизация определенных стадий. Для улучшения эффективности технологической схемы переработки ильменитового концентрата требуются совершенствование технологий учета материальных ресурсов и разработка мер по повышению устойчивости и оптимиза-

⁷Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619022, Российская Федерация. Программа для расчета материального баланса процесса выделения и очистки тетрахлорида титана из парогазовой смеси / В.А. Слободин, В.Ю. Бажин, С.Б. Фокина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». Заявка № 2024617885, заявл. 15.04.2024; опубл. 18.04.2024.

⁸Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618462, Российской Федерации. Программа для расчета материальных балансов процессов магниевтермического восстановления тетрахлорида титана и вакуумной сепарации реакционной массы / В.А. Слободин, В.Ю. Бажин, А.С. Ануфриев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». Заявка № 2024617420, заявл. 10.04.2024; опубл. 12.04.2024.

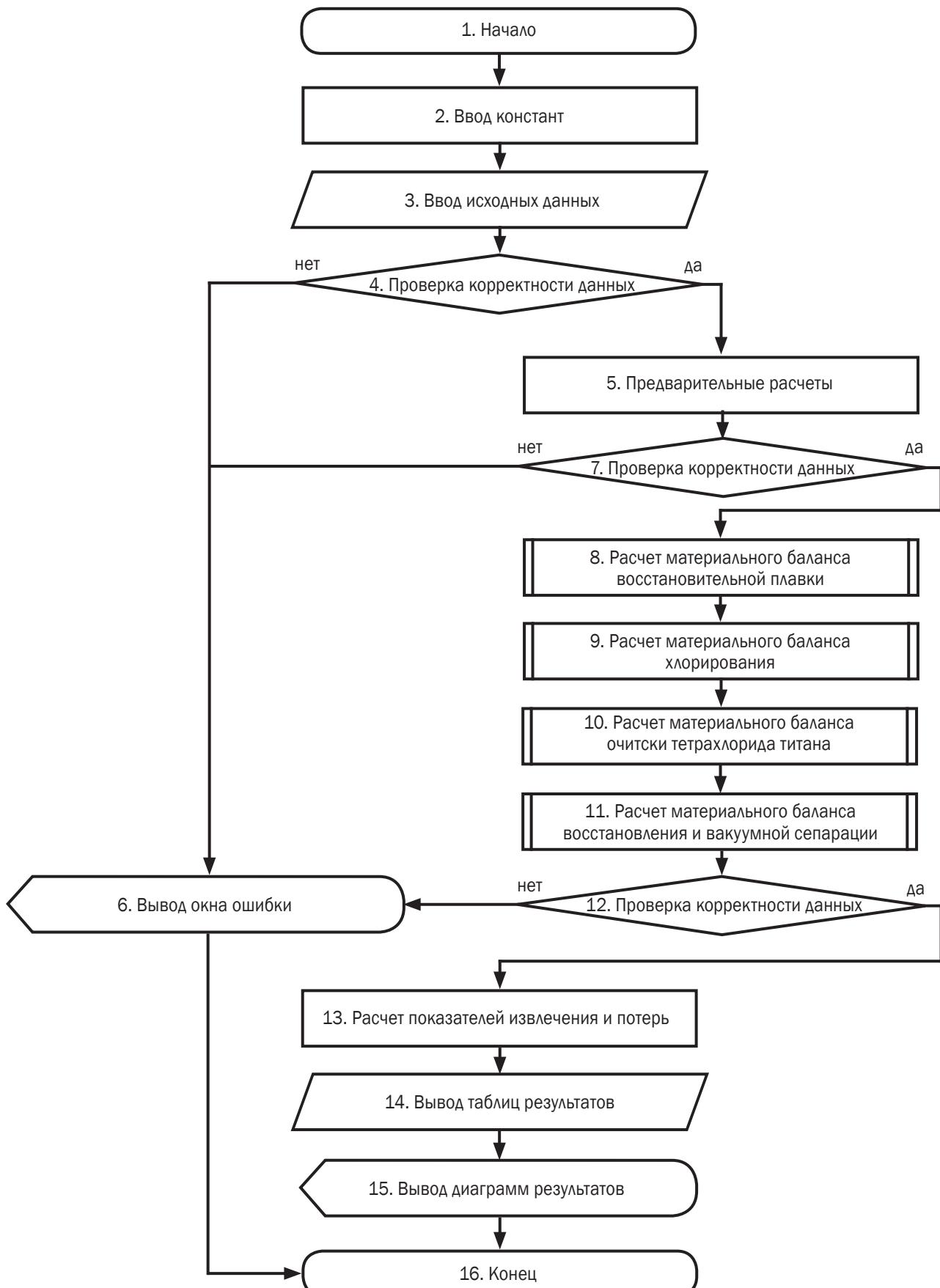


Рис. 4. Блок-схема алгоритма
Fig. 4. Algorithm flow chart

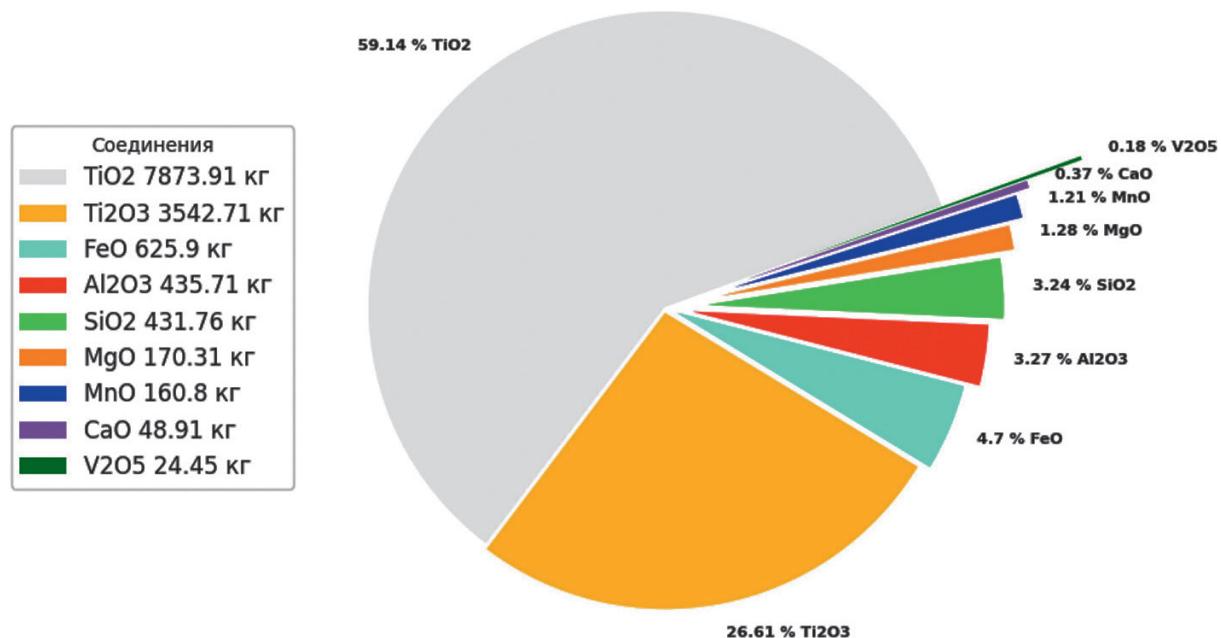


Рис. 5. Диаграмма состава титанового шлака при составе концентраты по табл. 1 и массе загрузки руднотермической печи по концентрату в 25 т⁵

Fig. 5. Diagram of titanium slag composition with concentrate composition according to Table 1 and ore-thermal furnace charge weight for concentrate of 25 tons⁵

Таблица 2. Таблица показателей извлечения и потерь титана по переделам⁸
Table 2. Table of titanium extraction and loss indicators by processing stages⁸

Технологическая операция	Извлечение		Потери		
	%	кг	%	кг	отн. %
Восстановительная плавка	93,37	7080,57	6,63	503,10	31,01
Хлорирование в расплаве	99,67	7056,97	0,33	23,60	1,456
Очистка тетрахлорида титана (IV)	87,08	6145,42	12,92	911,54	56,18
Магнитермическое восстановление	97,50	5991,79	2,50	153,64	9,49
Вакуумная сепарация	99,49	5961,06	0,51	30,73	1,89
Итого по всей технологии	78,60	5961,06	21,40	1622,61	100

ции хода производственного процесса. Наибольшее внимание стоит обратить на стадии восстановительной плавки, выделения и очистки $TiCl_4$ из парогазовой смеси. Результаты данного анализа потерь могут служить основой для дальнейшего планирования и совершенствования технологических процессов переработки ильменитового концентрата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный учет материальных потоков технологической схемы переработки ильменитового концентрата имеет важное значение для улучшения устойчивости и надежности поставок титана в России. Данное исследование, основанное на использовании метода MFA, формирует научно обоснованную модель движения материала, вклю-

чая оценку запасов и перемещения на различных этапах.

Улучшение процессов контроля и учета материальных ресурсов на ключевых стадиях переработки ильменитового концентрата – от восстановительной плавки до рафинирования – способствует повышению извлечения титана и минимизации потерь титана в виде нецелевых продуктов, а также снижению расхода реагентов и энергозатрат на каждом этапе технологической схемы. Сокращение образования отходов производства и рациональное использование сырья играют важную роль в достижении экологической устойчивости и экономической целесообразности производства титана, что особенно важно для долгосрочной стратегии развития титановой отрасли.

Программный комплекс, реализованный на основе метода MFA, продемонстрировал высокую эффективность в выявлении недостатков и предоставлении инстру-

ментов для точного расчета материальных балансов различных стадий технологической схемы переработки титансодержащего сырья.

Список источников

1. Головина Е.И., Гребнева А.В. Управление ресурсами подземных вод на трансграничных территориях (на примере Российской Федерации и Эстонской Республики) // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 788–800. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.2>. EDN: SMZDQY.
2. Golovina E.I., Khloponina V.S., Tsiglianu P.P., Zhu Runchu. Organizational, economic and regulatory aspects of groundwater resources extraction by individuals (case of the Russian Federation) // Resources. 2023. Vol. 12. Iss. 8. P. 89. <https://doi.org/10.3390/resources12080089>. EDN: IWIOFX.
3. Ковальская К.В., Горланов Е.С. Лигатуры Al - Ti - В: формирование структуры в модифицированных сплавах // Цветные металлы. 2022. № 7. С. 57–64. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.06>. EDN: CQDUOG.
4. Пашкевич М.А., Евдокимова М.Е. Тонкодисперсные отходы титанового производства как добавка для изготовления строительных материалов // Экология и промышленность России. 2025. Т. 29. № 2. С. 19–23. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-2-19-23>. EDN: KMWLNS.
5. Садыхов Г.Б. Фундаментальные проблемы и перспективы использования титанового сырья в России // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2020. Т. 63. № 3-4. С. 178–194. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-178-194>. EDN: JNYSEU.
6. Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И., Красоткина А.О. Уникальные титановые месторождения Тимана: вопросы генезиса и возраста // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 275–289. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.32>. EDN: ZVBWXU.
7. Карапев М.А., Поспехов Г.Б., Астапенко Т.С., Шишко В.С. Модели прогнозирования напряженно-деформированного поведения слабых техногенных грунтов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 11. С. 49–69. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_49. EDN: EOTJVE.
8. Pardo F.R.O., Herrera J.A.P., Perez M.C. R., Cabascango V.E.Q., Urbano A.P.M. Scientific fundamentals for the use of serpentinized rocks from the eastern region of Cuba // Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2573. Iss. 1. P. 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2573/1/012033>. EDN: FWIMBS.
9. Гармата В.А., Петрунько А.Н., Галицкий Н.В., Олесов Н.В., Сандрер Р.А. Титан: свойства, сырье, физико-химические основы и методы получения. М.: Металлургия, 1983. 558 с.
10. Надольский А.П. Расчеты процессов и оборудования для производства тугоплавких металлов. М.: Металлургия, 1980. 127 с.
11. Кузин Е.Н., Мокрушин Л.Г., Кручинина Н.Е. Оценка возможности использования лейкоксен-кварцевого концентрата в качестве сырья для производства титанатов алюминия и магния // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 886–894. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.15>. EDN: PTGWCU.
12. Cisternas L.A., Ordóñez J.I., Jeldres R.I., Serna-Guerrero R. Toward the Implementation of circular economy strategies: an overview of the current situation in mineral processing // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2021. Vol. 43. Iss. 6. P. 775–797. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1946690>. EDN: LWCBBLW.
13. Farjana S.H., Huda N., Mahmud M.P., Lang C. Towards sustainable TiO₂ production: an investigation of environmental impacts of ilmenite and rutile processing routes in Australia // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 196. P. 1016–1025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.156>.
14. Fedorova E.R., Pupysheva E.A., Morgunov V.V. Modeling of particle size distribution in the presence of flocculant // Symmetry. 2024. Vol. 16. Iss. 1. P. 114. <https://doi.org/10.3390/sym16010114>. EDN: XDACLL.
15. Fedorova E.R., Morgunov V.V., Pupysheva E.A. Effect of variation of internal diameter along the length of a rotary kiln on material movement // Non-ferrous Metals. 2024. Iss. 1. P. 28–34. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.01.05>. EDN: AECPQC.
16. Глазатов А.Н., Молодцов М.С., Казаков А.М., Бразюлис Л.А. Совершенствование методики и системы контроля балансовых продуктов на обогатительной фабрике АО «Кольская ГМК» // Цветные металлы. 2020. № 12. С. 88–93. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.12.13>. EDN: YGCHEU.
17. Бушуев А.Б., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Мансурова О.К. Синтез оптимальных информационно-энергетических схем измерительных и преобразующих устройств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 10. С. 518–526. <https://doi.org/10.17587/mau.22.518-526>. EDN: XNQXQB.
18. Немчинова Н.В., Патрушов А.Е., Тютрин А.А. Изучение процесса переработки пылей электросталеплавильного производства методом физико-химического моделирования // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 12. С. 13–19. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-12-13-19>. EDN: CFWWQL.
19. Ануфриев А.С., Лебедик Е.А., Смирнов А.А. Автоматизированная система управления шаровой загрузкой помольных агрегатов // Обогащение руд. 2024. № 1. С. 3–9. <https://doi.org/10.17580/or.2024.01.01>. EDN: PQBKRZ.

20. Кульчицкий А.А., Мансурова О.К., Николаев М.Ю. Распознавание дефектов грузоподъемных канатов металлургического оборудования оптическим методом с использованием нейронных сетей // Черные металлы. 2023. № 3. С. 81–88. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.03.13>. EDN: SUXTGW.
21. Skamyin A., Shklyarskiy Y., Lobko K., Dobush V., Sutikno T., Jopri M.H. Impedance analysis of squirrel-cage induction motor at high harmonics condition // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2024. Vol. 33 Iss. 1. P. 31–41. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i1.pp31-41>.
22. Бажин В.Ю., Устинова Ю.В., Федоров С.Н., Шалаби М.Э.Х. Повышение энергоэффективности рудно-термических печей при выплавке алюмосиликатного сырья // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 384–391. EDN: RTQXSE.
23. Bazhin V., Masko O. Monitoring of the behaviour and state of nanoscale particles in a gas cleaning system of an ore-thermal furnace // Symmetry. 2022. Vol. 14. Iss. 5. P. 923. <https://doi.org/10.3390/sym14050923>. EDN: FMOKAC.
24. Токарев И.С. Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности // Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 171–180. EDN: UIZSOQ.
25. Quiroz V.E, Calvopiña D. Training of highly qualified specialists in the field of software development: problems and solutions in higher educational institutions of Ecuador // Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems: ITM Web of Conferences. 2024. Vol. 59. P. 04008. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20245904008>.
26. Ефимов Д.А., Господариков А.П. Технико-технологические аспекты использования валков с профилем в форме треугольника Рёло в дробящих агрегатах на рудоподготовительном переделе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10-2. С. 117–126. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_102_0_117. EDN: JEBNYR.
27. Гендлер С.Г., Василенко Т.А., Степанцова А.Ю. Экспериментальные исследования параметров массопереноса в каменных углях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 135–148. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_135. EDN: KLQAFM.
28. Martynov S.A., Liu Z., Luzin A.G. Equipment upgrade and repair // Metallurgist. 2024. Vol. 68. Iss. 7. P. 1073–1079. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01817-z>. EDN: IQXGQX.
29. Martynov S.A., Liu Z. Controlled placement of electrodes in an ore-smelting furnace and its effect on the reaction zone // Metallurgist. 2024. Vol. 67. Iss. 11-12. P. 1866–1877. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01684-8>. EDN: XSBYIU.
30. Оксенгойт Е.А., Куницкий Н.А., Петров П.А., Шестаков А.К. Современные приборы АО «СоюзЦМА» для контроля аэрозолей и фиксации разливов агрессивных сред // Цветные металлы. 2023. № 4. С. 61–65. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.08>. EDN: UJLKQC.
31. Черемисина О.В., Васильев Р.Е., Нетрусов А.О., Тер-Оганесянц А.К. Влияние процессов горячего кондиционирования и кипчения с известью продукта автоклавной переработки высокомышьяковистого медного сырья на показатели извлечения драгоценных металлов при последующем цианировании // Цветные металлы. 2024. № 2. С. 19–26. <https://doi.org/10.17580/tsm.2024.02.02>. EDN: IMNEDS.
32. Hu Xinyi, Luo Fanjie, Lin Jing, Wang Minxi, Li Xin. Dynamic material flow analysis of titanium sponge in China: 2000–2019 // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 371. P. 133704. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133704>. EDN: GTFHLL.
33. Li Xin, Lin Jing, Zhang Di, Xiong Zehui, He Xiaoqiong, Yuan Miao, et al. Material flow analysis of titanium dioxide and sustainable policy suggestion in China // Resources Policy. 2020. Iss. 67. P. 101685. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101685>. EDN: LREGSU.
34. Садыхов Г.Б., Гончаров К.В., Олюнина Т.В., Гончаренко Т.В. Особенности фазового состава ванадийсодержащих титановых шлаков от восстановительной плавки титаномагнетитового концентрата Куранахского месторождения // Металлы. 2010. № 4. С. 3–10. EDN: NAVQUT.
35. Садыхов Г.Б., Гончаров К.В., Гончаренко Т.В., Олюнина Т.В. Особенности фазовых превращений при окислении кальцийсодержащих титанованадиевых шлаков и их влияние на образование ванадатов кальция // Металлы. 2013. № 2. С. 3–11. EDN: PXPXPD.

References

1. Golovina E.I., Grebneva A.V. Management of groundwater resources in transboundary territories (on the example of the Russian Federation and the Republic of Estonia). *Journal of Mining Institute*. 2021;252:788-800. (In Russ). <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.2>. EDN: SMZDQY.
2. Golovina E.I., Khloponina V.S., Tsiglianu P.P., Zhu Runchu. Organizational, economic and regulatory aspects of groundwater resources extraction by individuals (case of the Russian Federation). *Resources*. 2023;12(8):89. <https://doi.org/10.3390/resources12080089>. EDN: IWIOFX.
3. Kovalskaya K.V., Gorlanov E.S. Al – Ti – B master alloys: structure formation in modified alloys. *Tsvetnye metally*. 2022;7:57–64. (In Russ). <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.06>. EDN: CQDUOG.
4. Pashkevich M., Evdokimova M. Finely-dispersed wastes of titanium production as an additive for manufacturing of building materials. *Ecology and Industry of Russia*. 2025;29(2):19-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-2-19-23>. EDN: KMWLNS.

5. Sadykhov G.B. Fundamental problems and prospects for the use of titanium raw materials in Russia. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(3-4):178-194. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-178-194>. EDN: JNYSEU.
6. Makeev A.B., Bryanchaninova N.I., Krasotkina A.O. Unique titanium deposits of Timan: genesis and age issues. *Journal of Mining Institute*. 2022;255:275-289. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.32>. EDN: ZVBWXU.
7. Karasev M.A., Pospehov G.B., Astapenko T.S., Shishkina V.S. Stress-strain behavior prediction models for weak manmade soil. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;11:49-69. (In Russ). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_49. EDN: EOTJVE.
8. Pardo F.R.O., Herrera J.A.P., Perez M.C. R., Cabascango V.E.Q., Urbano A.P.M. Scientific fundamentals for the use of serpentized rocks from the eastern region of Cuba. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023;2573(1):012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2573/1/012033>. EDN: FWIMBS.
9. Garmata V.A., Petrunko A.N., Galitsky N.V., Olesov N.V., Sandler R.A. *Titanium: properties, raw materials, physico-chemical bases and production methods*. Moscow: Metallurgiya; 1983, 558 p. (In Russ).
10. Nadolsky A.P. *Calculations of processes and equipment for refractory metal production*. Moscow: Metallurgiya; 1980, 127 p. (In Russ).
11. Kuzin E.N., Mokrushin L.G., Kruchinina N.E. Assessment of the possibility of using leucoxene-quartz concentrate as raw material for production of aluminium and magnesium titanates. *Journal of Mining Institute*. 2023;264:886-894. (In Russ). <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.15>. EDN: PTGWCU.
12. Cisternas L.A., Ordóñez J.I., Jeldres R.I., Serna-Guerrero R. Toward the implementation of circular economy strategies: an overview of the current situation in mineral processing. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021;43(6):775-797. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1946690>. EDN: LWCBBLW.
13. Farjana S.H., Huda N., Mahmud M.P., Lang C. Towards sustainable TiO₂ production: an investigation of environmental impacts of ilmenite and rutile processing routes in Australia. *Journal of Cleaner Production*. 2018;196:1016-1025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.156>.
14. Fedorova E.R., Pupysheva E.A., Morgunov V.V. Modeling of particle size distribution in the presence of flocculant. *Symmetry*. 2024;16(1):114. <https://doi.org/10.3390/sym16010114>. EDN: XDACLL.
15. Fedorova E.R., Morgunov V.V., Pupysheva E.A. Effect of variation of internal diameter along the length of a rotary kiln on material movement. *Non-ferrous Metals*. 2024;1:28-34. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.01.05>. EDN: AECPQC.
16. Glazatov A.N., Molodtsev M.S., Kazakov A.M., Brazyulis L.A. Optimized product quality control at Kola MMC's mineral processing plant. *Tsvetnye metally*. 2020;12:88-93. (In Russ). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.12.13>. EDN: YGCHEU.
17. Bushuev A.B., Boikov V.I., Bystrov S.V., Grigoriev V.V., Mansurova O.K. Synthesis of optimal Information and energy schemes of measuring and converting devices. *Mechatronics, Automation, Control*. 2021;22(10):518-526. (In Russ). <https://doi.org/10.17587/mau.22.518-526>. EDN: XNQXQB.
18. Nemchinova N.V., Patrushev A.E., Tyutrin A.A. Study of the process of processing electric steel melting dusts by the method of physicochemical modeling. *Ecology and Industry of Russia*. 2024;28(12):13-19. (In Russ). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-12-13-19>. EDN: CFWQL.
19. Anufriev A.S., Lebedik E.A., Smirnov A.A. Automated ball charge control system for grinding units. *Obogashchenie Rud*. 2024;1:3-9. (In Russ). <https://doi.org/10.17580/or.2024.01.01>. EDN: PQBKRZ.
20. Kulchitsky A.A., Mansurova O.K., Nikolaev M.Yu. Recognition of defects in hoisting ropes of metallurgical equipment by an optical method using neural networks. *Chernye Metally*. 2023;3:81-88. (In Russ). <https://doi.org/10.17580/chm.2023.03.13>. EDN: SUXTGW.
21. Skamyin A., Shklyarskiy Y., Lobko K., Dobush V., Sutikno T., Jopri M.H. Impedance analysis of squirrel-cage induction motor at high harmonics condition. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2024;33(1):31-41. <https://doi.org/10.11591/ijeeecs.v33.i1.pp31-41>.
22. Bazhin V.Yu., Ustinova Ya.V., Fedorov S.N., Shalabi M.E.Kh. Improvement of energy efficiency of ore-thermal furnaces in smelting of aluminosilicic raw materials. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:384-391. (In Russ). EDN: RTQXSE.
23. Bazhin V., Masko O. Monitoring of the behaviour and state of nanoscale particles in a gas cleaning system of an ore-thermal furnace. *Symmetry*. 2022;14(5):923. <https://doi.org/10.3390/sym14050923>. EDN: FMOKAC.
24. Tokarev I.S. Development of parameters for an industry-specific methodology for calculating the electric energy storage system for gas industry facilities. *Journal of Mining Institute*. 2025;272:171-180. (In Russ). EDN: UIZSOQ.
25. Quiroz V.E, Calvopiña D. Training of highly qualified specialists in the field of software development: problems and solutions in higher educational institutions of Ecuador. In: *Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems: ITM Web of Conferences*. 2024;59:04008. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20245904008>.
26. Efimov D.A., Gospodarikov A.P. Technical and technological aspects of the use of Reuleaux triangular profile rolls in crushing units in the ore processing plant. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;10-2:117-126. (In Russ). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_102_0_117. EDN: JEBNYR.
27. Gendler S.G., Vasilenko T.A., Stepantsova A.Yu. Investigation of mass transfer of hard coal during its transportation to the place of temporary storage. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;9-1:135-148. (In Russ). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_135. EDN: KLQAFM.

28. Martynov S.A., Liu Z., Luzin A.G. Equipment upgrade and repair. *Metallurgist.* 2024;68(7):1073-1079. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01817-z>. EDN: IQXGQX.
29. Martynov S.A., Liu Z. Controlled placement of electrodes in an ore-smelting furnace and its effect on the reaction zone. *Metallurgist.* 2024;67(11-12):1866-1877. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01684-8>. EDN: XSBYIU.
30. Oksengoyt E.A., Kunitskiy N.A., Petrov P.A., Shestakov A.K. Modern equipment by Soyuzsvetmetavtomatika for detecting aerosols and spills of harmful pollutants. *Tsvetnye metally.* 2023;4:61-65. (In Russ). <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.08>. EDN: UJLKQC.
31. Cheremisina O.V., Vasiliev R.E., Netrusov A.O., Ter-Oganesyants A.K. Hot curing and lime boiling of high-arsenic copper concentrate pressure oxidation product and their effect on precious metals recovery during subsequent cyanidation. *Tsvetnye metally.* 2024;2:19-26. (In Russ). <https://doi.org/10.17580/tsm.2024.02.02>. EDN: IMNEDS.
32. Hu Xinyi, Luo Fanjie, Lin Jing, Wang Minxi, Li Xin. Dynamic material flow analysis of titanium sponge in China: 2000-2019. *Journal of Cleaner Production.* 2022;371:133704. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133704>. EDN: GTFHLL.
33. Li Xin, Lin Jing, Zhang Di, Xiong Zehui, He Xiaoqiong, Yuan Miao, et al. Material flow analysis of titanium dioxide and sustainable policy suggestion in China. *Resources Policy.* 2020;67:101685. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101685>. EDN: LREGSU.
34. Sadykhov G.B., Goncharov K.V., Olyunina T.V., Goncharenko T.V. Phase composition features of the vanadium-containing titanium slags produced from the reduction smelting of the titanomagnetite concentrate from the Kuranakhsk deposit. *Metally.* 2010;4:3-10. (In Russ). EDN: NAVQUT.
35. Sadykhov G.B., Goncharov K.V., Goncharenko T.V., Olyunina T.V. Features of phase transformations during oxidation of calcium-containing titanium-vanadium slags and their influence on calcium vanadate formation. *Metally.* 2013;2:3-11. (In Russ). EDN: PXPXPD.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Косовцева Татьяна Реноальдовна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры цифрового моделирования,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., д. 2, Россия
Kosovtseva_TR@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7165-072X>

Сизякова Екатерина Викторовна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., д. 2, Россия
sizyakova_ev@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4665-091X>

Слободин Виктор Андреевич,

студент,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., д. 2, Россия
✉ s242803@stud.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0001-9784-8168>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatiana R. Kosovtseva,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Digital Modeling,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining
University,
2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia
Kosovtseva_TR@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7165-072X>

Ekaterina V. Sizyakova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Metallurgy Department,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining
University,
2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia
sizyakova_ev@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4665-091X>

Viktor A. Slobodin,

Student,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining
University,
2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia
✉ s242803@stud.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0001-9784-8168>

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.07.2025 г.; одобрена после рецензирования 17.08.2025 г.; принятa к публикации 30.08.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 01.07.2025; approved after reviewing 17.08.2025; accepted for publication 30.08.2025.