

УДК 65.011.5:661.63

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ

Пучков А.Ю., Василькова М.А.

*Смоленский филиал Национального исследовательского университета «МЭИ», Смоленск,
e-mail: putchkov63@mail.ru, vasilkova_mariya00@mail.ru*

Предметом исследования является вторичная переработка экологически небезопасных промышленных отходов. Представлены результаты системного анализа проблемы утилизации отходов апатит-нефелиновых руд, хранящихся в отвалах (хвостохранилищах) горно-обогатительных комбинатов, для оценки потенциала их использования в системах комплексной энергоресурсоэффективной и экологически безопасной переработки, включающей обжиговые машины конвейерного типа и руднотермические печи. Показано негативное влияние отходов апатит-нефелиновых руд на окружающую среду, выражающееся не только в захлавлении больших площадей, прилегающих к горно-обогатительным комбинатам, но и химическом загрязнении почвы, подземных вод, воздушного бассейна за счет выветривания и образования мелкодисперсной пыли. Представлен подход к оценочному анализу физико-химических, гранулометрических, литологических и теплофизических характеристик отходов апатит-нефелиновых руд. Отмечена целесообразность их вторичного использования в многостадийном энергоресурсоэффективном химико-энерготехнологическом процессе промышленного производства фосфора. В нотации IDEF0 построена функциональная модель, отражающая декомпозицию процесса вторичного использования техногенных отходов горно-обогатительных комбинатов. В системе MatLAB разработана программа и представлен ее интерфейс для системы поддержки принятия решений, входящей в состав функциональной модели. В алгоритмическом обеспечении программы используется метод выбора недоминируемых альтернатив на основе нечеткого отношения предпочтения.

Ключевые слова: системный анализ, переработка техногенных отходов, экологическая безопасность, производство фосфора

SYSTEM ANALYSIS AND ASSESSMENT OF THE POTENTIAL OF THE USE OF APATITE-NEFELINE WASTE WASTES OF MINING-PROCESSING COMBINATES

Puchkov A. Yu., Vasilkova M. A.

*Smolensk Branch of National Research University «MPEI», Moscow, e-mail: putchkov63@mail.ru,
vasilkova_mariya00@mail.ru*

The subject of research is the recycling of environmentally hazardous industrial waste. The results of a system analysis of the problem of utilization of apatite-nepheline ores stored in dumps (tailing dumps) of mining and processing plants are presented to assess the potential of their use in integrated energy-efficient and environmentally friendly processing systems, including conveyor-type kiln machines and ore-smelting furnaces. The negative impact of apatite-nepheline ore wastes on the environment, which is expressed not only in cluttering large areas adjacent to mining and processing plants, but also in chemical pollution of soil, groundwater, and air due to weathering and the formation of fine dust. An approach to the evaluation analysis of physicochemical, particle size, lithological and thermal characteristics of apatite-nepheline ore wastes is presented. The expediency of their recycling in the multi-stage energy-efficient energy-chemical-technological process of industrial production of phosphorus is noted. In IDEF0 notation, a functional model was constructed reflecting the decomposition of the process of recycling man-made waste from mining and processing plants. The MatLAB system has developed a program and presented its interface for the decision support system, which is part of the functional model. The algorithmic support of the program uses the method of selecting non-dominated alternatives based on a fuzzy preference relation.

Keywords: system analysis, processing of industrial waste, environmental safety, phosphorus production

Минимизация экологического ущерба от производственной деятельности в современном мире выходит на первый план при рассмотрении возможности реализации инновационных проектов в том или ином регионе. В России вопросам экологии стали уделять одно из главенствующих мест, о чем свидетельствует принятый и утвержденный в январе 2019 г. президентом Советом при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам проект «Экология». В проекте включающем в себя одиннадцать направлений деятельности и экологиче-

ского мониторинга, особо подчеркивается важность вторичной переработки отходов производства и потребления.

Крупными источниками промышленных отходов являются горнопромышленные предприятия. Например, только по Мурманской области еще в 2015 г. объем минеральных отходов составлял примерно 8,8 млрд т [1]. Их отрицательное воздействие на экологию региона проявляется по нескольким направлениям: захламенение значительных прилегающих к комбинату территорий; образование при выветривании мелкодисперсной, содержащей вред-

ные примеси пыли, что приводит к росту бронхо-легочных заболеваний [2]; загрязнение почвы и воды содержащимися в отходах ядовитыми соединениями, образующимися в результате переработки руды [3, 4]. Учитывая важность данной проблемы для Мурманской области, там, в 2013 г., местной администрацией был утвержден Перечень объектов накопленного экологического ущерба (с указанием местоположения и площади), а с 2014 г. реализуется программа ликвидации накопленного экологического ущерба.

Ситуация с отходами горнопромышленных предприятий является недопустимой не только с точки зрения экологической составляющей, но и с точки зрения эффективного использования минерального фосфорсодержащего сырья, которым является апатит, присутствующий в отвалах. Поэтому выработка общей стратегии управления отходами, налаживание ресурсоэнергоэффективной вторичной переработки отвалов горнопромышленных предприятий по обогащению апатит-нефелиновых руд представляет собой актуальную задачу, решение которой позволит не только уменьшить экологическое воздействие на окружающую среду, но и получить экономическую выгоду при применении многостадийного энергоресурсоэффективного химико-энерготехнологического процесса промышленного производства фосфора.

Цель исследования: оценка объемов отходов апатит-нефелиновых руд, хранящихся в отвалах (хвостохранилищах) горно-обогажительных комбинатов, а также оценки потенциала их использования в системах комплексной энергоресурсоэффективной и экологически безопасной переработки при промышленном производстве фосфора. Для достижения данной цели необходимо:

- оценить объемы и химический состав отходов апатит-нефелиновых руд, хранящихся в отвалах горно-обогажительных комбинатов России;

- в соответствии с принципами системного анализа выполнить декомпозицию задачи вторичной переработки отходов на основе методов функционального моделирования по стандарту IDEF0;

- предложить методы оценки целесообразности проведения мероприятий по вторичному использованию отходов апатит-нефелиновых руд в процессах промышленного производства фосфора;

- провести модельные расчеты для иллюстрации работоспособности предлагаемых методов в системах комплексной энергоресурсоэффективной и экологически безопасной переработки отходов апатит-не-

фелиновых руд при промышленном производстве фосфора.

Материалы и методы исследования

Месторождения апатит-нефелиновой руды сейчас открыты на Урале, Красноярском крае, Кемеровской области, Кузнецком Ала-Тау, Кольском полуострове (крупнейшее по объемам). Для этих горнопромышленных регионов существуют схожие экологические проблемы, одной из которых является наличие больших объемов отходов деятельности горно-обогажительных комбинатов, оцениваемых в миллиарды тонн [1, 5]. Рассматривая эту проблему с другой стороны, отходы можно считать поликомпонентными техногенными месторождениями (ТМ), содержащими вторичные минеральные ресурсы, которые должны вовлекаться во вторичную переработку. Например, по своему минеральному и химическому составу хвостохранилища ОАО «Апатит» представляют собой залежи нефелина, сфена, титаномагнетита, апатита. Концентрация оксида фосфора P_2O_5 в отвалах ОАО «Апатит» находится в пределах 0,3–0,5%, получение кондиционного апатитового концентрата (39% P_2O_5) проводится с помощью флотации [6], а это уже уровень, позволяющий организовывать экологически безопасный многостадийный процесс производства фосфора, включающий обжиговые машины конвейерного типа и руднотермические печи.

Комплексное освоение недр с целью эффективного вторичного использования хвостохранилищ должно базироваться на системном подходе. В его рамках учитываются не только объемы и физико-химический состав отходов, но также гранулометрические (относительное содержание частиц различных размеров независимо от их химического или минералогического состава), литологические (закономерности распределения пластов в отвалах) и теплофизические характеристики отходов апатит-нефелиновых руд [7]. Отметим, что при решении проблемы переработки техногенных отходов необходимо учитывать и несовершенство нормативно-правовой базы в этом вопросе, так как здесь регулирование ведется на основе двух законов – «О недрах» и «Об отходах производства и потребления», курируемых разными отраслями права.

Методы исследования в представляемой работе базируются на системном анализе проблемы использования ТМ апатит-нефелиновых руд для промышленного производства фосфора. На начальном этапе анализа выполняется декомпозиция общей проблемы на отдельные составляющие подзадачи с целью более глубокого понимания перечня необходимых процедур и конкретики их реализации.

В приводимом исследовании декомпозиция общей задачи оценки потенциала использования отходов апатит-нефелиновых руд горно-обогажительных комбинатов проводилась на основе стандарта IDEF0, предоставляющего нотацию функционального моделирования процессов. Первый уровень декомпозиции контекстной диаграммы функциональной модели рассматриваемой задачи оценки потенциала показан на рис. 1.

Представленное на рис. 1 разбиение сложной задачи на отдельные элементы позволяет, с одной стороны, еще на начальном этапе исследований определиться с ключевыми элементами, требующими учета и анализа, а с другой стороны – реализовать распараллеливание работ и добиться снижения временных

затрат на решение. Декомпозиция оценки потенциала использования техногенных отходов позволяет увидеть совокупность функций (процессов), которые требуется реализовывать при формировании окончательного решения при выборе направления вторичного использования ТМ.

Разнообразие задач приводит к необходимости применения мультидисциплинарного подхода, который в представленной схеме проявляется в виде математических моделей, входящих в верхние части функциональных блоков, что в стандарте IDEF0 подразумевает управление исследуемым процессом. Учитывая разнообразие задач анализа, отраженных на первом уровне декомпозиции общей проблемы использования отходов горно-обогатительных комбинатов (рис. 1), модели также будут представлять разные области знаний. В зависимости от вида отходов и предполагаемого дальнейшего их использования, а также сырья, которое из них будет добываться, конкретный вид обозначенных моделей может быть весьма широк. Рассматривая далее хвостохранилища апатит-нефелиновых руд, возможным вариантом их переработки можно считать получение фосфора из его оксида.

На сегодняшний день существует большая база моделей, посвященных теоретическим и практическим аспектам производства фосфора из отвалов апатит-нефелиновых руд, а также оптимизации энергопотребления этого процесса [8, 9].

Следует отметить, что входными (исходными) данными функциональной модели на рис. 1 может выступать не только информация из паспортов отходов горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, но и специализированные базы данных, такие, например, как банк данных техногенных месторождений (БДТМ), подготовленный Горным институтом Кольского филиала Академии наук.

Банк содержит данные, распределенные более чем по двадцати разделам: возможные направления использования отхода, его минеральный и грануло-

метрический состав, объем запасов, физико-механические свойства техногенного сырья, его химический состав, экологические свойства и другие [1]. Получаемая таким образом, из таких источников исходная информация может служить начальным материалом для дальнейшего комплексного анализа в соответствии с представленной моделью.

Блок проведения дополнительных исследований и анализов ТМ функциональной модели (рис. 1) предполагает возможность учета специфики использования отходов, в том числе обработку данных, представленных мнениями экспертов, содержащих дополнительные качественные характеристики как самих отходов, так и инфраструктуры местности их расположения, ситуации на внутренних и внешних рынках. Эти особенности информации приводят к необходимости применения формальных математических моделей, работающих с лингвистическими переменными, в частности моделей на основе методов нечеткой логики [10].

Блок агрегирования результатов частных анализов, в соответствии с принимаемыми критериями оптимальности, проводит оценку потенциала дальнейшего использования отходов по заданным направлениям. Укрупненно различные направления вторичного применения отходов можно выразить следующими вариантами: прямое использование без переработки; переработка, но без вторичных отходов; переработка с целью извлечения минеральных компонентов. Первые два направления на сегодняшний момент активно развиваются, но потребности в такой переработке невелики. Перспективным является третье направление, что определяется несколькими факторами, среди которых следует отметить снижение кондиций на добычу руд (поэтому старые пласты в хвостохранилищах обладают более высоким содержанием минеральных компонентов), а также то, что добыча и производство концентрата из отходов оказывается намного экономичнее, чем при добыче и переработке бедных руд [1].

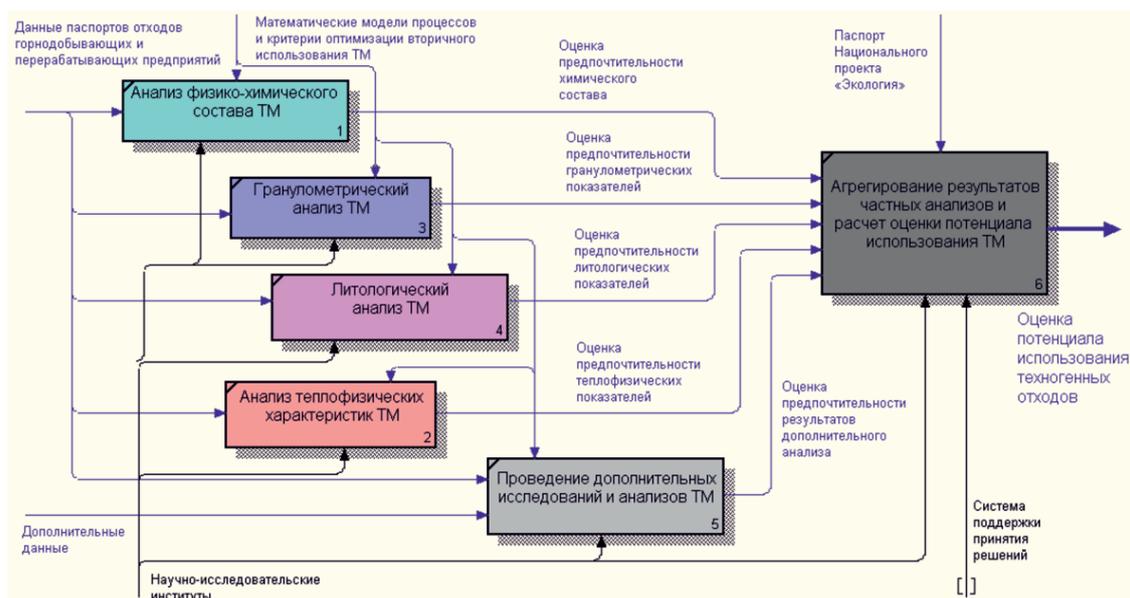


Рис. 1. Декомпозиция задачи оценки потенциала использования техногенных отходов

Система поддержки принятия решений (СППР) на рис. 1 обозначена как механизм, реализующий функцию блока, к которому подходит соответствующая стрелка. При выборе алгоритма работы СППР было учтено ранее принятая методология нечеткой логики, а также то, что варианты дальнейшего использования отходов могут не иметь явного преимущества. В соответствии с этим был задействован нечетко-логический метод многокритериального выбора недоминируемых альтернатив на основе нечеткого отношения предпочтения [11].

Результаты исследования и их обсуждение

Блоки модели, отражающие выполнение функций анализа (гранулометрического, литографического, дополнительного, физико-химического состава и теплофизических свойств), на своих выходах формируют оценки предпочтительности получаемых результатов в соответствии с выбранным критерием на основе применения математических моделей ТМ. Дальнейшая обработка происходит в блоке агрегирования частных результатов с помощью СППР. Предложенные методы функционирования СППР для выбора направлений переработки отходов ТМ были реализованы в программной среде MatLAB. Главная форма графического интерфейса СППР с результатами модельного примера представлена на рис. 2. Интерфейс программы отражает возможность осущест-

влять не только оценку потенциала вторичной переработки отходов апатит-нефелиновых руд, выражаемой матрицей оценок, но и проводить анализ чувствительности получаемых оценок к изменениям значений функций принадлежности направлений по критериям в диапазоне $[x - x\sigma, x + x\sigma]$, где x – изменяемое значение функции принадлежности критерия.

Заключение

В процессе проведенного исследования был выявлено, что объемы техногенных отходов апатит-нефелиновых руд горно-обогатительных комбинатов России в настоящее время превышают несколько миллиардов тонн, и проблема их вторичного использования стоит как никогда остро. Декомпозиция задачи оценки потенциала вторичной переработки отходов в рамках проведения системного анализа позволила обозначить основные функции, которые при этом необходимо обеспечить.

Представлено описание интерфейса разработанного программного обеспечения для СППР по оценке потенциала использования техногенных отходов апатит-нефелиновых руд, в алгоритмической основе которого лежит метод многокритериального выбора альтернатив на основе нечеткого отношения предпочтения.

ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Количество критериев: Количество направлений использования:

1. Сформировать таблицы по заданному числу критериев и направлений
2. Заполните таблицы функций принадлежности и веса критериев

Таблица значений функций принадлежности каждого направления по критериям

Нмера направлений в торичного использования ТМ апатит-нефелиновых руд

	1	2	3
Частные оценки	0.4480	0.5240	0.6010
	0.5110	0.5440	0.3020
	0.5700	0.3650	0.5520
	0.5100	0.6210	0.4900

Вес критерия	
1	0.2000
2	0.3000
3	0.3000
4	0.2000

3. Провести выбор направления вторичного использования ТМ

РЕЗУЛЬТАТ ВЫБОРА

Номер направления: Матрица оценок потенциала направления:

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Величина диапазона сигма: Матрица чувствительности S:

Выход

Рис. 2. Главная форма СППР оценки потенциала использования техногенных отходов

Предложенный подход к системному анализу проблемы переработки отходов горно-обогатительной промышленности и разработанное программное обеспечение могут быть применены для оценки потенциала и направлений использования техногенных месторождений различной структуры и минерального состава заинтересованными организациями и научными учреждениями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-24094.

Список литературы

1. Архипов А.В. Техногенные месторождения. Разработка и формирование / Под науч. ред. акад. Н.Н. Мельникова. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 175 с.
2. Карначев И.П., Головин К.А., Панарин В.М. Вредные производственные факторы в технологии добычи и переработки апатит-нефелиновых руд Кольского Заполярья // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2012. Вып. 1. Ч. 2. С. 95–100.
3. Mekki A., Awali A., Aloui F. et al. Mine Water Environ. 2017. № 36. 502 p. DOI: 10.1007/s10230-016-0424-2.
4. Mekki A., Sayadi S. Water Air Soil Pollut. 2017. № 228. 215 p. DOI: 10.1007/s11270-017-3399-0.
5. Гершенкоп А.Ш., Хохуля М.С., Мухина Т.Н. Переработка техногенного сырья Кольского полуострова. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/pererabotka-tehnogenogo-syrya-kolskogo-poluostrova> (дата обращения: 20.05.2019).
6. Иванова В.А., Митрофанова Г.В. Особенности флотации апатита из складированных отходов обогащения апатит-нефелиновой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 5. С. 135–141.
7. Крашенинников О.Н., Белогурова Т.П. Перспективы использования минерально-сырьевой базы Кольского полуострова для получения строительного щебня и песка // Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных и технических материалов. Сыктывкар: Геопринт, 2007. С. 56–58.
8. Panchenko S.V., Meshalkin V.P., Dli M.I., Borisov V.V. Computer-visual model of thermophysical processes in electrothermal reactor. Tsvetnye Metally. 2015. № 4. P. 55–60.
9. Bobkov V.I., Fedulov A.S., Dli M.I., Meshalkin V.P., Morgunova E.V. Scientific basis of effective energy resource use and environmentally safe processing of phosphorus-containing manufacturing waste of ore-dressing barrows and processing enterprises. Clean Technologies and Environmental Policy. 2018. № 20 (10). P. 2209–2221.
10. Moradi M., Basiri S., Kananian A., Kabiri K. Kashani. Fuzzy logic mineral potential mapping for copper exploration using multi-disciplinary geo-datasets, a case study in seridune deposit, Iran/Earth Science Informatics, March 2015. V. 8. P. 197–205. DOI: 10.1007/s12145-015-0246-y.
11. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2004. 203 с.