

УДК 66.047

## КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПТИМАЛЬНОМУ УПРАВЛЕНИЮ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ХИМИКО- ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД

© 2021 г. В. П. Мешалкин<sup>а</sup>, В. И. Бобков<sup>б, \*</sup>, М. И. Дли<sup>б</sup>, А. С. Федулов<sup>б</sup>, А. И. Шинкевич<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

<sup>б</sup>Национальный исследовательский университет “МЭИ” в г. Смоленске, Смоленск, Россия

<sup>с</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

\*e-mail: vovabobkoff@mail.ru

Поступила в редакцию 15.04.2020 г.

После доработки 18.06.2020 г.

Принята к публикации 18.06.2020 г.

Разработаны многоуровневые алгоритмы принятия решений по оптимальному управлению энерго-ресурсоэффективностью и экологической безопасностью химико-энерготехнологической системы переработки отходов апатит-нефелиновых руд, включающей измельчитель, окомкователь, обжиговую конвейерную машину и рудно-термическую печь. Учитывается взаимозависимая совокупность параметров получаемых сырых окатышей на выходе с тарельчатого гранулятора, обожженных окатышей на выходе с конвейера обжиговой машины и загружаемых в рудно-термическую печь от характеристик исходного мелкодисперсного техногенного сырья, а также влияние этих показателей переработки отходов на качество и чистоту конечной продукции – желтого фосфора. Представлена содержательная и математическая постановка задачи оптимального управления энерго-ресурсоэффективностью сложной многостадийной химико-энерготехнологической системы переработки отходов апатит-нефелиновых руд с получением желтого фосфора, учитывающая пространственно-временную взаимозависимость химико-энерготехнологических процессов, протекающих в системе. Комплексным критерием энерго-ресурсоэффективности является себестоимость электрической и тепловой энергий, расхода воды и кокса, затрачиваемых на переработку отходов апатит-нефелиновых руд в рассматриваемой химико-энерготехнологической системе. Установлено, что в оптимальном режиме функционирования системы интенсифицируются все химико-энерготехнологические процессы, уменьшается расход энергии, кокса и повышается качество и чистота готового продукта – желтого фосфора. В проведенном исследовании решена актуальная научно-практическая задача повышения энерго-ресурсоэффективности и экологической безопасности комплексной системы переработки техногенных отходов апатит-нефелиновых руд на базе интенсификации протекающих в ней химико-энерготехнологических процессов.

*Ключевые слова:* энерго-ресурсоэффективность, химико-энерготехнологическая система, химико-энерготехнологический процесс, техногенные отходы, обжиговая машина, рудно-термическая печь, оптимальное управление, гранулятор

DOI: 10.31857/S0040357121010103

### ВВЕДЕНИЕ

Системный анализ техногенных отходов апатит-нефелиновых руд, хранящихся в отвалах горно-обогатительных комбинатов (ГОК), включающий анализ объемов, физико-химических, гранулометрических, литологических и теплофизических характеристик, показал перспективность вовлечения их в экологически безопасную вторичную переработку [1, 2]. Химико-энерготехнологические процессы (ХЭТП) переработки техногенных отходов

требуют значительных затрат энергии, причем примерно 80% в общих энергетических затратах занимает дорогостоящая электроэнергия для питания рудно-термических печей и привода силового оборудования обжиговых конвейерных машин и гранулятора (окомкователя) для производства окатышей из отходов апатит-нефелиновых руд [3–5]. Энергетические затраты увеличиваются при переработке мелкодисперсных отходов для производства окатышей [6, 7]. Эффектив-

**Таблица 1.** Удельный расход энергий в рудно-термической печи

Тип РТП	Электроэнергия	Кокс
РКЗ-72Ф	14.9 (МВт ч)/т	2.35 ТУТ/т
РКЗ-80Ф	14.3 (МВт ч)/т	1.56 ТУТ/т

ность потребления энергии в процессах переработки отходов базируется на возможности управления ХЭТП, протекающими в техногенном сырье при высокотемпературной термической обработке, на основе интенсификации тепло- и массообменных процессов [8–11].

Поэтому актуальной научно-практической задачей является разработка многоуровневых алгоритмов принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью и экологической безопасностью химико-энерготехнологической системы (ХЭТС) переработки отходов апатит-нефелиновых руд с учетом зависимости показателей окатышей на выходе обжиговой машины от характеристик исходного мелкодисперсного техногенного сырья и влияния этих показателей на качество конечной продукции переработки отходов в рудно-термических печах [12–15]. Такие алгоритмы должны учитывать наличие множества управляющих воздействий как для каждой вакуум-камеры обжиговой машины конвейерного типа, так и для рудно-термической печи; набора характеристик исходного, промежуточного и конечного техногенного сырья для рудно-термической печи; совокупности функциональных зависимостей параметров конечной продукции рассматриваемой ХЭТС от этих характеристик, а также возможность рационального использования вторичных энергетических ресурсов при замыкании и перераспределении энергетических потоков в ХЭТС [16–18].

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ХЭТС ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ АПАТИТ- НЕФЕЛИНОВЫХ РУД

Разрабатываемые авторами многомасштабные математические и компьютерные модели и алгоритмы оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТС переработки отходов апатит-нефелиновых руд учитывают сложную многоуровневую иерархическую структуру схемы формирования критерия, представленной на рис. 1.

Иерархия уровней ХЭТС формируется следующим естественным образом.

Во-первых, обеспечивается учет всех химико-технологических, гранулометрических, литологических характеристик отходов из отвалов горно-обогажительных комбинатов апатит-нефели-

новых руд [19, 20]. Происходит формирование вектора характеристик отходов  $VI$ .

Во-вторых, в измельчителе, где отходы перемалываются в однородную мелкодисперсную массу, происходит расход электрической энергии  $H_0$  и технической воды  $R_0$ , которые незначительно зависят от характеристик отходов:  $H_0 = H_0(VI)$  и  $R_0 = R_0(VI)$  [21, 22].

В-третьих, тарельчатый гранулятор (окомкователь) производит сырые окатыши из мелкодисперсной измельченной массы отходов [23]. На это затрачивается электрическая энергия  $H_1$  и техническая вода  $R_1$ . Их расход определяется не столько исходными характеристиками отходов  $VI$ , сколько размерами производимых окатышей  $r_{ок}$ . Здесь  $r_{ок}$  – радиус окатышей, получаемых на окомкователе (тарельчатом грануляторе). Управляющие переменные:  $\varphi$  – угол наклона тарелки гранулятора и  $v$  – скорость ее вращения. Они определяют радиус получаемых окатышей, от которого зависит расход электроэнергии  $H_1 = H_1(r_{ок}; VI)$  и воды  $R_1 = R_1(r_{ок}; VI)$ .

В-четвертых, проводится расчет теплофизических и химико-технологических свойств полученных в окомкователе сырых окатышей [24, 25].

В-пятых, сырые окатыши с влажностью  $u$  поступают на конвейер обжиговой машины для термической обработки [26, 27]. Основными целевыми ХЭТП здесь являются: сушка, эндотермические реакции диссоциации карбонатов  $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2 - Q_1$  и  $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 - Q_2$ , где  $Q_1 = 1.21 \times 10^5$  Дж/моль – тепловой эффект реакции разложения  $MgCO_3$ ,  $Q_2 = 1.78 \times 10^5$  Дж/моль – тепловой эффект реакции разложения  $CaCO_3$ , спекание, обеспечивающее конечную прочность обожженных окатышей [28]. Здесь управляющим параметром является вектор  $(T_{gi}; W_{gi})$ , где  $T_{gi}$  и  $W_{gi}$  – температура и скорость перекрестной подачи газа-теплоносителя в движущуюся на конвейере обжиговой машины плотную многослойную массу окатышей в каждой отдельной  $i$ -й вакуум-камере. Этот вектор определяет расход электрической и тепловой энергии  $H_2 = H_2(r_{ок}; u; VI)$  и  $S_2 = S_2(r_{ок}; u; VI)$ .

В-шестых, прошедшие термическую обработку на конвейерной обжиговой машине окатыши из отходов апатит-нефелиновых руд поступают на переплавку в рудно-термическую печь для возгонки желтого фосфора. Рудно-термическая печь (РТП) – наиболее энергоемкая подсистема исследуемой ХЭТС. Так, например, удельный расход на тонну готового продукта электрической энергии и кокса – тонн условного топлива (ТУТ) представлен в табл. 1.

Характерными особенностями ХЭТП, протекающих в РТП при переработке отходов апатит-

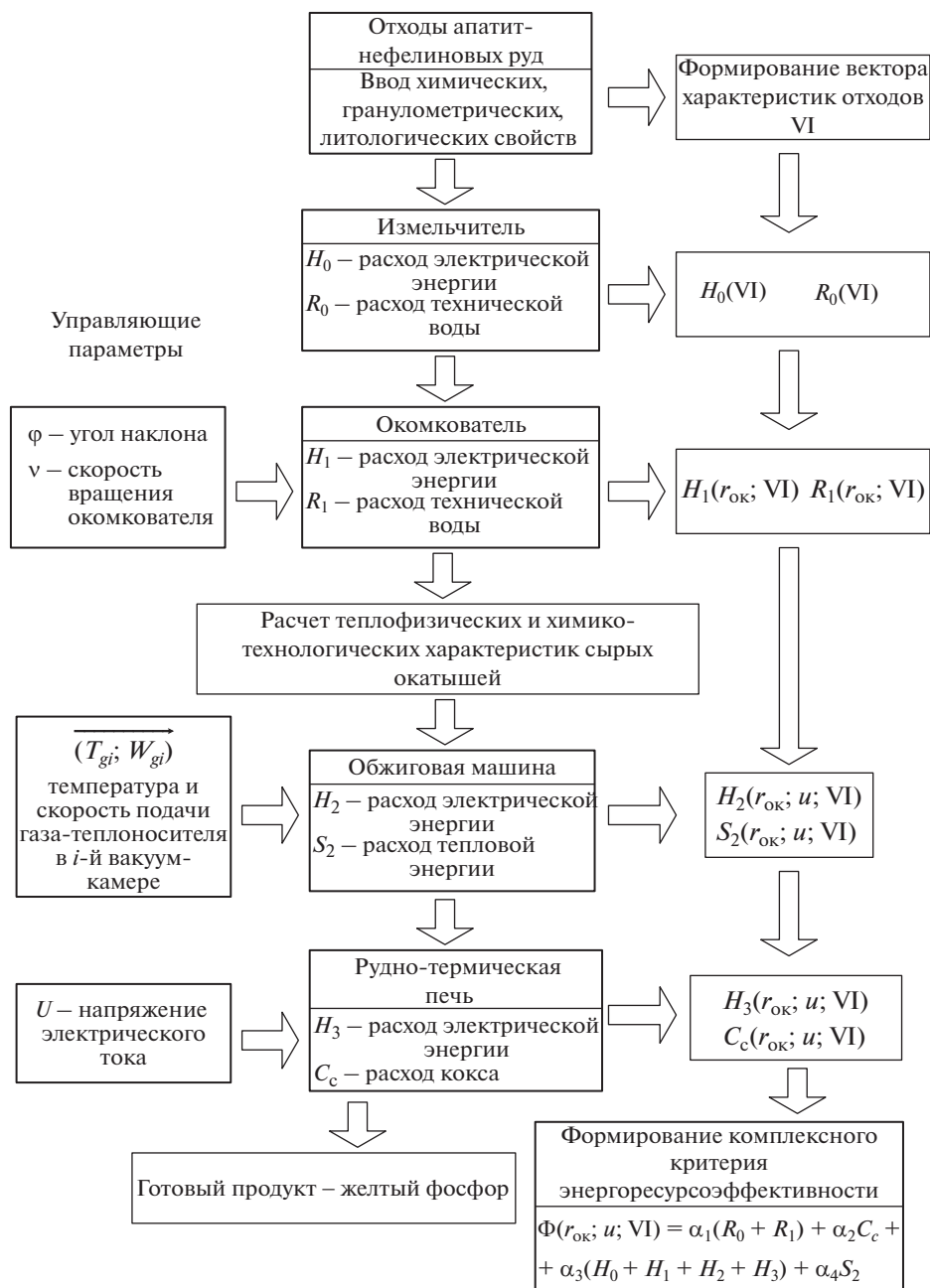


Рис. 1. Схема формирования комплексного критерия энергоресурсоэффективности ХЭТС переработки отходов апатит-нефелиновых руд в желтый фосфор.

нефелиновых руд являются: совокупность взаимосвязанных сложных физико-химических превращений, различные фазовые состояния реагентов, нестабильность состава загружаемой шихты, трудность контроля многих важных величин при управлении режимами функционирования [29, 30].

При высокой температуре в РТП протекают сложные химические реакции с образованием газообразных и жидкофазных продуктов, одним из которых является фосфор  $P_4$ . Из-за того что фос-

фор образуется в газовой фазе, количество продукта зависит от состава газовой фазы и запыленности газового потока. Основные причины пылеобразования следующие: механические уносы (дают около 22% пыли), окислы фосфора  $P_4O_6$ ,  $P_4O_{10}$  (образуются путем окисления фосфора газами  $CO_2$  и  $H_2O$ , реагирующими с возгонами щелочных металлов и механическими уносами, увеличивая массу пыли до 82%), испаряющиеся из высокотемпературных областей под электродами соединения Si, Na, K.

Пыль обычно адсорбируется шихтовой многослойной массой и в РТП формируются зоны, обогащенные конденсатами и возгонами. Установлено, что при скачкообразных повышениях мощности РТП пылеунос повышается, что негативно сказывается на содержании шлама в конденсаторах фосфора. Содержание пыли на выходе из РТП составляет 75–95 г/м<sup>3</sup>, а в неблагоприятных режимах функционирования увеличивается до 290 г/м<sup>3</sup>.

Газы проходят очистку в электрофильтрах, работающих в термостатированных условиях при температуре 600 К во избежание нежелательной конденсации фосфора. Пыль собирается в баках с водой с образованием так называемого котрельного молока, которое удаляется при достижении плотности 1.3 г/см<sup>3</sup>. Выделение фосфора из печных газов, содержащих не более 80 мг/м<sup>3</sup> пыли, осуществляется в орошаемых водой цилиндрических конденсаторах, имеющих КПД более 98%. Очищенный печной газ с концентрацией до 400 мг/м<sup>3</sup> Р<sub>4</sub> и 0.3–0.9% РН<sub>3</sub>, а также СО удаляется через трубы и сжигается в свечах.

Основными управляющим параметрами РТП являются напряжение электрического тока и расход кокса  $H_3 = H_3(r_{ок}; u; VI)$  и  $C_c = C_c(r_{ок}; u; VI)$ .

Авторами разработаны многомасштабные математические и компьютерные модели функционирования сложных подсистем – РТП, исследованы теплофизические аспекты самоорганизации и интенсификации ХЭТП в этих многофазных технологических реакторах [4, 6, 7]. Научно обоснованы процедуры принятия решений по повышению энергоресурсоэффективности работы РТП.

Предложенный подход позволил разработать компьютеризированную информационную поддержку принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью и экологической безопасностью ХЭТС переработки отходов апатит-нефелиновых руд на основе комплексного критерия энергоресурсоэффективности

$$\Phi(r_{ок}; u; VI) = \alpha_1 (R_0 + R_1) + \alpha_2 C_c + \alpha_3 (H_0 + H_1 + H_2 + H_3) + \alpha_4 S_2, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  – стоимость технической воды,  $\alpha_2$  – стоимость кокса,  $\alpha_3$  – стоимость электрической энергии,  $\alpha_4$  – стоимость тепловой энергии.

#### АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОПТИМАЛЬНОМУ УПРАВЛЕНИЮ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

Разработанные авторами многомасштабные математические и компьютерные модели ХЭТП и многоуровневые алгоритмы оптимального управ-

ления энергоресурсоэффективностью ХЭТС были практически реализованы в виде комплекса программ, используемого для оптимального управления ХЭТС переработки отходов горно-обогатительных комбинатов апатит-нефелиновых руд. Созданный комплекс позволяет имитировать основные энергоемкие высокотемпературные ХЭТП, протекающие в отходах на различных стадиях их переработки. Архитектура компьютеризированной системы и комплекса программ оптимального управления энергоресурсоэффективностью ХЭТС сформирована по модульному принципу (см. рис. 2).

Модуль базы данных по свойствам и характеристикам отходов из отвалов горно-обогатительных комбинатов систематизирует объемы, гранулометрический, литологический и химический состав, теплофизические и термодинамические характеристики техногенных отходов апатит-нефелиновых руд. Систематизируются свойства конструкционных материалов, используемых в ХЭТС.

Модуль многомасштабного математического и компьютерного моделирования сформирован как иерархия классов объектно-ориентированного программирования.

1. Класс, определяющий иерархическую взаимосвязь и структуру моделей.

2. Расчет теплофизических характеристик техногенного сырья из отвалов ГОК, таких как теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность, коэффициенты теплоотдачи, а также теплофизических характеристик печных газов рудно-термической печи и газа-теплоносителя в обжиговой машине.

3. Расчет модели измельчителя, потребляющей электроэнергию и техническую воду.

4. Класс для расчета окомкователя, который также потребляет электроэнергию и техническую воду, учитывающий управляющие переменные – угол наклона и скорость вращения тарелки.

5. Класс расчета обжиговой конвейерной машины, потребляющей электрическую и тепловую энергии. Управляющим воздействием является двумерный массив температуры и скорости подачи газа-теплоносителя в каждой отдельной вакуум-камере машины.

6. Класс, описывающий модель самого энергоемкого агрегата – рудно-термической печи, которая потребляет подавляющее количество электрической энергии. Управляющим воздействием служит напряжение электрического тока на электродах.

Интеллектуально-аналитический блок содержит следующие модули: оптимального управления, дискретного динамического программирования и интеграционный.



**Рис. 2.** Схема архитектуры информационной компьютеризированной системы поддержки принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью ХЭТС переработки отходов апатит-нефелиновых руд.

В модуле оптимального управления происходит формирование частных критериев энергоресурсоэффективности измельчителя, окомкователя, обжиговой конвейерной машины, рудно-термической печи. Определяются управляющие перемен-

ные, ограничения на технические возможности агрегатов, технологические ограничения на параметры функционирования ХЭТС. Формируются ограничения в виде неравенств на управляющие переменные и на переменные состояния ХЭТП.



Рис. 3. Научно-методологические основы системного анализа характеристик отходов апатит-нефелиновых руд.

В интеграционном модуле выделяются следующие классы: формирования исходных данных, преобразования формата данных, передачи и контроля целостности данных.

Модуль дискретного динамического программирования содержит классы дискретизации по времени ХЭТС и критерия энергоресурсоэффективности, а также вычислительно-эвристические алгоритмы оптимального управления.

Отдельным модулем включаются экспериментальные данные по режимам функционирования ХЭТС.

#### ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

С помощью разработанной системы проводилась оценка экономического потенциала их использования в ХЭТС комплексной энергоресурсоэффективной экологически безопасной переработки, а также обоснования общего состава и

технологических процессов в ХЭТС по производству желтого фосфора.

На рис. 3 приведены научно-методологические основы системного анализа характеристик отходов апатит-нефелиновых руд.

Системный анализ отходов апатит-нефелиновых руд, хранящихся в отвалах (хвостохранилищах) горно-обогатительных комбинатов, показал, что с точки зрения учета приведенных выше обстоятельств наиболее перспективным по своему минеральному и химическому составу являются растущие объемы техногенных отходов переработки апатит-нефелиновых руд Кольского полуострова. Например, в Мурманской области в 2017 г. объем фосфорсодержащих техногенных отходов составлял примерно 8.9 млрд тонн. Хвостохранилища только ОАО «Апатит», представляющие собой залежи нефелина, сфена, титаномагнетита и апатита, оцениваются примерно в 900 млн тонн с содержанием оксида фосфора  $P_2O_5$  в диапазоне 0.4–0.6%.

Данная динамика показывает, что современной научной проблемой являются оценка объемов и химического состава отходов апатит-нефелиновых руд, хранящихся в отвалах ГОК Российской Федерации, и выбор методов их вторичного использования в процессах промышленного производства фосфора.

Анализ практики функционирования предприятий фосфорной промышленности показал, что использование для получения фосфора некондиционных обедненных фосфорсодержащих отходов резко повышает разнородность характеристик сырья, попадающего в обогатительную обработку. Например, на практике концентрация  $P_2O_5$  варьируется от 0 до 30%, а  $SiO_2$  — от 5 до 90%. В результате ни одна отрасль промышленности современной России не обрабатывает руды с такой широкой вариацией характеристик, что определяет необходимость разработки новых подходов к построению ХЭТС получения фосфора из отходов с учетом вариабельности характеристик партий из различных отвалов.

Авторами проанализированы основные характеристики фосфорсодержащих отходов ГОК РФ из различных отвалов с точки зрения их вариабельности. Результаты анализа показали, что отвалы имеют и общие черты — материал в хвостохранилищах относится в основном к кремнисто-карбонатному мелкодисперсному сырью со сложными фосфатными оолитами.

Анализ потенциала извлечения фосфора из отходов показывает, что, например, из отвалов ОАО «Апатит» ( $P_2O_5$  находится в пределах 0.4–0.6%) при переработке может быть получен апатитовый продукт с содержанием 24–29%. Этой концентрации фосфора вполне достаточно для нужд сельского хозяйства. Полученный продукт, в свою очередь, может быть направлен на дообогащение, что обеспечит выпуск дополнительной конечной продукции глубокой переработки. Учитывая низкие содержания  $P_2O_5$  в промышленных продуктах обогащения, получение кондиционного апатитового концентрата (39%  $P_2O_5$ ) может осуществляться в рамках самостоятельного цикла по флотационной схеме. Результаты флотации показывают возможность получения апатитовых концентратов с содержанием 39.0–39.2%  $P_2O_5$  при извлечении 83.4–87.8%. Процесс характеризуется низкой циркуляционной нагрузкой — 5–7%.

В результате из мелко- и среднезернистых песков складированных отходов, содержащих 3.0–4.3%  $P_2O_5$ , можно получать кондиционные апатитовые концентраты (39%  $P_2O_5$ ) при извлечении 85–88%  $P_2O_5$  и отвальные хвосты с содержанием 0.5–0.8%  $P_2O_5$ . При этом наибольшим потенциа-

лом обладают отвалы 1930–1940-х гг., что связано с переработкой более богатых руд. Так, содержание  $P_2O_5$  в этих отвалах составляет около 3%, в отвалах 1960-х гг. (промышленный район) — 1.4%, а 1950–1963 гг. — 2.5%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ состава отвалов ГОК с использованием разработанной компьютеризированной системы принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью химико-энерготехнологической системы показывает, что они состоят в основном из мелкодисперсного сырья. Это определяет целесообразность их предварительного окомкования и последующей термической обработки. Такой способ позволяет не только производить фосфорсодержащую продукцию с использованием комплексной ХЭТС, но и перевозить полученные окатыши для последующей переработки в рамках логистически эффективных систем утилизации отходов ГОК. Последнее обстоятельство определяется потребностями со стороны предприятий ОПК в чистом фосфоре, который может быть получен на основе электротермической возгонки.

Научно обосновано перспективное направление — создание сложной многостадийной ХЭТС переработки отходов апатит-нефелиновых руд, включающей грануляторы, обжиговые машины конвейерного типа и рудно-термические печи, позволяющей организовывать экологически безопасный многостадийный процесс производства фосфора с учетом необходимости снижения затрат на тепловую и электрическую энергию, в том числе на основе ее вторичного использования.

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № FSWF-2020-0019).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А., Девярых Т.О., Спиринов Н.А. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 2 // Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл. 2017. Т. 60. № 1. С. 19.
2. Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина М.В. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Часть 1 // Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл. 2018. Т. 61. № 1. С. 11.
3. Panchenko S.V., Shirokikh T.V. Thermophysical processes in burden zone of submerged arc furnaces // Theor. Found. Chem. Eng. 2014. V. 48. № 1. P. 77. [Панченко С.В., Широких Т.В. Теплофизические процессы в шихтовой зоне электротермических рудовосстановительных реакторов // Теор. осн. хим. технол. 2014. Т. 48. № 1. С. 83.]

4. *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 Technol. Environ. Policy*. 2018. V. 20. № 10. P. 2209.
5. *Гурин И.А., Лавров В.В., Спиринов Н.А., Никитин А.Г.* Веб-технологии построения информационно-моделирующих систем технологических процессов в металлургии // *Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл.* 2017. Т. 60. № 7. С. 573.
6. *Meshalkin V., Bobkov V., Dli M., Dovi V.* Optimization of energy and resource efficiency in a multistage drying process of phosphate pellets // *Energies*. 2019. V. 12. № 17. P. 3376.
7. *Bobkov V.I., Fedulov A.S., Dli M.I., Meshalkin V.P.* Studying the chemical and energy engineering process of the strengthening calcination of phosphorite pellets containing free carbon // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2018. V. 52. № 4. P. 525. [*Бобков В.И., Федулов А.С., Дли М.И., Мешалкин В.П.* Исследование химико-энерготехнологического процесса упрочняющего обжига фосфоритовых окатышей, содержащих свободный углерод // *Теор. осн. хим. технол.* 2018. Т. 52. № 4. С. 423.]
8. *Леонтьев Л.И.* Физико-химические особенности комплексной переработки железосодержащих руд и техногенных отходов // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Екатеринбург, 2016. С. 92.
9. *Meshalkin V.P., Belozerskii A.Y., Men'shova I.I., Bobkov V.I., Dli M.I.* Optimizing the energy efficiency of a local process of multistage drying of a moving mass of phosphorite pellets // *Dokl. Chem.* 2019. V. 486. № 1. P. 144. [*Мешалкин В.П., Бобков В.И., Дли М.И., Белозерский А.Ю., Меньшова И.И.* Оптимизация энергоэффективности локального процесса многостадийной сушки движущейся массы фосфоритовых окатышей // *Докл. Акад. наук.* 2019. Т. 486. № 3. С. 316.]
10. *Meshalkin V.P., Puchkov A.Y., Dli M.I., Bobkov V.I.* Generalized model for engineering and controlling a complex multistage chemical energotechnological system for processing apatite-nepheline ore wastes // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2019. V. 53. № 4. P. 463. [*Мешалкин В.П., Пучков А.Ю., Дли М.И., Бобков В.И.* Обобщенная модель инжиниринга и управления сложной многостадийной химико-энерготехнологической системой переработки отходов апатит-нефелиновых руд // *Теор. осн. хим. технол.* 2019. Т. 53. № 4. С. 363.]
11. *Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Dli M.I.* Automated decision support system in energy- and resource-efficiency management of a chemical-energy engineering system for roasting phosphorite pellets // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2019. V. 53. № 6. P. 960. [*Мешалкин В.П., Бобков В.И., Дли М.И.* Автоматизированная система поддержки принятия решений по управлению энергоресурсоэффективностью химико-энерготехнологической системы обжига фосфоритовых окатышей // *Теор. осн. хим. технол.* 2019. Т. 53. № 6. С. 609.]
12. *Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M.* Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2015. V. 119. № 1. P. 265.
13. *Yang X.-F.* Mechanism of roasting and agglomeration on the pellets produced by blended iron ore fines of hematite and magnetite // *J. Iron Steel Res.* 2010. V. 22. № 2. P. 6.
14. *Montastruc L., Azzaro-Pantel C., Biscans B., Cabassud M., Domenech S.* A thermochemical approach for calcium phosphate precipitation modeling in a pellet reactor // *Chem. Eng. J.* 2003. V. 94. № 1. P. 41.
15. *Luis P., Van der Bruggen B.* Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towards a sustainable chemical industry // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2014. V. 89. № 9. P. 1288.
16. *Fan X.-H., Gan M., Jiang T., Yuan L.-S., Chen X.-L.* Influence of flux additives on iron ore oxidized pellets // *J. Cent. South Univ. Technol. (Engl. Ed.)* 2010. V. 17. № 4. P. 732.
17. *Chen D., Zhu D.-Q., Chen Y.* Preparation of prereduced pellets by pyrite cinder containing nonferrous metals with high temperature chloridizing-reduction roasting technology // *ISIJ Int.* 2014. V. 54. № 10. P. 2162.
18. *Зайнуллин Л.А., Дружинин Г.М., Буткарев А.А.* Инновационные разработки ОАО ВНИИМТ для энергосбережения и экологии в металлургии // *Черн. металл.* 2014. № 7(1375). С. 79.
19. *Abzalov V.M., Bragin V.V., Klein V.I., Solodukhin A.A.* Efficiency of drying zones in roasting machines // *Steel Transl.* 2008. V. 38. № 12. P. 1008.
20. *Melamud S.G., Yur'ev B.P.* Oxidation of iron ore at moderate and high temperatures // *Steel Transl.* 2016. V. 46. № 6. P. 384.
21. *Bokovikov B.A., Bragin V.V., Shvydkii V.S.* Role of the thermal-inertia zone in conveyer roasting machines // *Steel Transl.* 2014. V. 44. № 8. P. 595.
22. *Bragin V.V., Bokovikov B.A., Naidich M.I., Gruzdev A.I., Shvydkii V.S.* Relation between the productivity and fuel consumption in roasting machines // *Steel Transl.* 2014. V. 44. № 8. P. 590.
23. *Солодухин А.А., Боковиков Б.А., Спиринов Н.А.* Уменьшение переувлажнения окатышей в зоне сушки обжиговой конвейерной машины // *Сталь.* 2014. № 8. С. 14.
24. *Брагин В.В., Боковиков Б.А., Найдич М.И., Груздев А.И., Швыдкий В.С.* О взаимосвязи производительности обжиговой машины и удельного расхода топлива // *Сталь.* 2014. № 8. С. 38.
25. *Павловец В.М., Герасимук А.В.* Особенности движения зародыша сложной формы на тарельчатом окомкователе в производстве железорудных окатышей // *Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл.* 2018. Т. 61. № 2. С. 87.
26. *Акбердин А.А., Ким А.С., Султангазиев Р.Б.* Планирование численного и физического эксперимента при моделировании технологических процессов //



- Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл. 2018. Т. 61. № 9. С. 737.
27. *Юрьев Б.П., Гольцев В.А.* Изменение эквивалентной порозности слоя окатышей по длине обжиговой конвейерной машины // Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл. 2017. Т. 60. № 2. С. 116.
28. *Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г., Спириг Н.А., Лавров В.В.* Математическая модель процесса обжига рудоугольных окатышей на конвейерной машине // Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл. 2017. Т. 60. № 4. С. 328.
29. *Новичихин А.В., Шорохова А.В.* Процедуры управления поэтапной переработкой железорудных отходов горнопромышленных районов // Изв. высш. учебн. завед. Черн. металл. 2017. Т. 60. № 7. С. 565.
30. *Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A.* Thermophysical properties of kachkanartitanomagnetite pellets // Steel Transl. 2016. V. 46. № 5. P. 329.