VOL. 1 | ISSUE 1 | JANUARY 2026

UNISCIENCE

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL



UniScience
International scientific journal

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТЕХНОЛОГИИ РЕЦИКЛИНГА ОТРАБОТАННОГО ЖЕЛЕЗО-ХРОМОВОГО КАТАЛИЗАТОРА В СТРОИТЕЛЬНЫЕ ПИГМЕНТЫ

Нурмонов Сувонқул Эрхонович
Национальный Университет Узбекистан
Нурмонов Алишер Аслиддин ўғли
“Навоиазот” АЖ
Азимов Сайдулло Хамидович
АО «O‘ZLITINEFTGAZ»

Аннотация. *В работе представлены результаты комплексной экологической и экономической оценки (жизненного цикла) технологии глубокой переработки отработанного железо-хромового катализатора СТК-1 в строительные железооксидные пигменты с использованием фосфорной кислоты в качестве реагента очистки. Методом материального и энергетического баланса проанализированы входные и выходные потоки для базового сценария переработки 76 тонн отходов. Установлено, что технология позволяет ликвидировать экологический ущерб от хранения отхода, оцениваемый в ~12.5 млн сум/год, и предотвратить выбросы, эквивалентные 45 тоннам CO_2. Расчет себестоимости пигмента показал значение 8500 сум/кг против среднерыночной цены импортного аналога 15000-18000 сум/кг. Чистый дисконтированный доход (NPV) проекта составляет 245 млн сум при сроке окупаемости (DPP) 1.8 года и внутренней норме доходности (IRR) 58%. Показано, что ключевыми факторами экологической эффективности являются рекуперация азота в виде аммонийфосфатов и отсутствие образования токсичных стоков, а*

UniScience International scientific journal

экономической – низкая стоимость сырья и высокий спрос на продукт. Технология соответствует принципам наилучших доступных технологий и циркулярной экономики.

Ключевые слова: *оценка жизненного цикла, рециклинг катализаторов, железооксидный пигмент, экологический ущерб, технико-экономическое обоснование, циркулярная экономика.*

Annotatsiya. *Ishlatilgan STK-1 temir-xrom katalizatorini chuqur qayta ishlash va fosfor kislotasi yordamida qurilish temir-oksidli pigmentlarini ishlab chiqarish texnologiyasining hayotiy sikli bo‘yicha kompleks ekologik-iqtisodiy baholash natijalari taqdim etilgan. Moddiy va energiya balansi usuli yordamida 76 tonna chiqindini qayta ishlashning asosiy stsenariysi uchun kirish va chiqish oqimlari tahlil qilindi. Texnologiya chiqindilarni saqlashdan kelib chiqadigan ekologik zararni (~12.5 mln so‘m/yil) bartaraf etishga va 45 tonna CO_2 ekvivalentiga teng chiqindilarning havoga chiqishining oldini olishga imkon berishi aniqlandi. Pigmentning o‘ziga xos tannarxi 8500 so‘m/kg ni tashkil etdi, bu import analogining o‘rtacha bozor narxi (15000-18000 so‘m/kg) dan past. Loyihaning sof diskontlangan daromadi (NPV) 245 mln so‘mni, qoplash muddati (DPP) 1.8 yilni va ichki daromad darajasi (IRR) 58% ni tashkil etadi. Ekologik samaradorlikning asosiy omillari azotni ammoniyfosfatlar shaklida tiklash va toksik chiqindilar hosil bo‘lmasligi, iqtisodiy samaradorlikning asosiy omillari esa xom ashyoning past narxi va mahsulotga yuqori talab ekanligi ko‘rsatildi. Texnologiya eng yaxshi mavjud texnologiyalar va aylana iqtisodiyoti tamoyillariga mos keladi.*

Kalit so‘zlar: *hayotiy sikl bahosi, katalizatorlarni qayta ishlash, temir-oksidli pigment, ekologik zarar, texnik-iqtisodiy asoslash, aylana iqtisodiyoti.*

Abstract. *The paper presents the results of a comprehensive environmental and economic life cycle assessment (LCA) of a technology for deep processing of spent iron-chromium catalyst STK-1 into construction iron oxide pigments using phosphoric acid as a cleaning reagent. The input and output flows for the base*

scenario of processing 76 tons of waste were analyzed using the material and energy balance method. It has been established that the technology makes it possible to eliminate environmental damage from waste storage, estimated at ~12.5 million soums/year, and prevent emissions equivalent to 45 tons of CO_2. The calculation of the pigment cost price showed a value of 8500 soums/kg against the average market price of an imported analogue of 15000-18000 soums/kg. The net present value (NPV) of the project is 245 million soums with a payback period (DPP) of 1.8 years and an internal rate of return (IRR) of 58%. It is shown that the key factors of environmental efficiency are the recovery of nitrogen in the form of ammonium phosphates and the absence of toxic wastewater generation, and economic efficiency are the low cost of raw materials and high demand for the product. The technology complies with the principles of best available techniques and the circular economy.

Keywords: *life cycle assessment, catalyst recycling, iron oxide pigment, environmental damage, techno-economic analysis, circular economy.*

UniScience
International scientific journal

Введение. Трансформация линейной модели экономики в циркулярную является глобальным трендом, особенно актуальным для ресурсоемких отраслей, таких как химическая промышленность [1, 2]. Ключевым элементом этой трансформации является разработка и внедрение технологий глубокой переработки промышленных отходов в товарные продукты с высокой добавленной стоимостью [3, 4]. Однако успешная реализация таких технологий невозможна без их комплексной оценки, выходящей за рамки традиционных лабораторных исследований. Необходимым инструментом для принятия обоснованных решений является оценка жизненного цикла (Life Cycle Assessment, LCA), интегрирующая экологические, технологические и экономические аспекты на всех стадиях – от добычи сырья до утилизации продукта [5, 6]. Для новых технологий, особенно основанных на рециклинге отходов, совмещение LCA с технико-экономическим обоснованием (ТЭО)

позволяет выявить «узкие места», количественно оценить экологические выгоды и экономическую целесообразность, что критически важно для привлечения инвестиций и промышленного внедрения [7, 8].

В Республике Узбекистан, где предприятия химического комплекса сталкиваются с проблемой накопления значительных объемов специфических отходов, таких как отработанные катализаторы, подобные исследования приобретают практическую государственную значимость [9]. Ранее была научно обоснована и экспериментально апробирована технология переработки отработанного железо-хромового катализатора СТК-1 (объем накопления на АО «Навоиазот» – 76 тонн) в строительные пигменты с использованием фосфорной кислоты [10, 11]. Данная технология показала преимущества с точки зрения эффективности очистки, коррозионной безопасности продукта и возможности рекуперации азота. Однако для завершения цикла исследований и обоснования инвестиций требуется количественная оценка ее полного воздействия на окружающую среду и экономики.

В литературе представлены многочисленные примеры LCA для процессов переработки различных отходов, включая металлосодержащие [12, 13]. Однако большинство исследований сосредоточены на западноевропейском или североамериканском контексте, с иными тарифами на энергию, сырье и затратами на захоронение отходов. Комплексные исследования, совмещающие детальный материально-энергетический анализ, расчет предотвращенного экологического ущерба и полноценное ТЭО для условий стран Центральной Азии, в частности для технологий рециклинга катализаторов, в доступных источниках отсутствуют.

Цель работы – проведение комплексной экологической и экономической оценки жизненного цикла технологии переработки отработанного катализатора СТК-1 в строительные пигменты, включая расчет материально-

энергетических балансов, определение предотвращенного экологического ущерба, оценку себестоимости продукта и основных финансовых показателей проекта для условий Республики Узбекистан.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования являлась разработанная технологическая схема переработки отработанного катализатора СТК-1 в железооксидный пигмент и жидкие комплексные удобрения [14]. За функциональную единицу в оценке жизненного цикла принята переработка 76 тонн накопленного отхода с получением товарных продуктов. Границы системы включили все основные стадии: подготовка сырья (дробление), гидрохимическая очистка (реактор с мешалкой, фильтр-пресс, сушильный узел), термообработка (муфельная печь), помол (шаровая мельница), упаковка пигмента, а также упарка и нейтрализация маточного раствора с получением удобрений.

Материальный и энергетический анализ проводился на основе экспериментальных данных, полученных в лабораторных и опытно-промышленных условиях [15]. Расчет потоков массы (сырье, реагенты, продукты, отходы) выполнялся для каждой стадии с учетом потерь и выхода целевых продуктов. Энергопотребление (электрическая и тепловая энергия) оценивалось на основе паспортных данных и расчетных характеристик модельного оборудования, приведенного к масштабу установки, с учетом типовых коэффициентов загрузки и потерь. Удельные расходы электроэнергии и пара принимались в соответствии с отраслевыми нормативами для химических производств Республики Узбекистан [16].

Экологическая оценка базировалась на методе расчета предотвращенного экологического ущерба. Оценивались два основных сценария: 1) Базовый (инерционный) – продолжение хранения отхода на полигоне предприятия; 2) Внедренческий – реализация технологии рециклинга. Для базового сценария рассчитывались ежегодные платежи за размещение отхода IV класса

опасности (катализатор СТК-1) согласно действующему природоохранному законодательству Узбекистана [17], а также потенциал воздействия, связанный с риском фильтрации и эмиссиями. Для внедренческого сценария учитывались прямые выбросы от работы оборудования (сожженное топливо, выбросы от сушки/обжига) и косвенные выбросы, связанные с генерацией потребляемой электроэнергии [18]. Специфические выбросы (пыль, оксиды азота, оксиды серы) пересчитывались в условные тонны по методике, основанной на показателях относительной опасности [19], а выбросы CO_2 – прямым счетом через расход топлива и электроэнергии. Потенциал сокращения ущерба определялся как разница между ущербом базового сценария (избегаемые затраты на захоронение и риск) и ущербом внедренческого сценария.

Технико-экономическое обоснование (ТЭО) выполнялось в соответствии с общепринятыми методиками [20, 21]. Расчет себестоимости пигмента включал статьи: сырье (отработанный катализатор по нулевой или символической стоимости, фосфорная кислота), вспомогательные материалы (вода, электроэнергия, природный газ), заработная плата с начислениями, амортизация оборудования, цеховые и общезаводские расходы. Цены на реагенты и энергоносители принимались по данным АО «Навоиазот» и среднереспубликанским тарифам на 2023 год [22]. Инвестиционные затраты оценивались методом аналогов и удельных показателей для оборудования химического профиля [23]. Финансовый анализ проекта осуществлялся на горизонте 10 лет. Рассчитывались ключевые показатели эффективности: чистый дисконтированный доход (Net Present Value, NPV), внутренняя норма доходности (Internal Rate of Return, IRR), срок окупаемости дисконтированный (Discounted Payback Period, DPP), индекс прибыльности (Profitability Index, PI). Ставка дисконтирования принята на уровне 15% с учетом рисков внедрения новой технологии [24]. Анализ чувствительности проводился по ключевым

переменным: цена на пигмент, стоимость фосфорной кислоты, производительность установки.

Статистическая обработка данных балансов и финансовых моделей проводилась с использованием программного обеспечения Microsoft Excel. Все расчеты выполнялись в национальной валюте (сум) с последующим пересчетом в доллары США по среднему курсу Национального банка Республики Узбекистан [25].

Результаты. *Материально-энергетические балансы.* На основе расчетов для базового сценария (переработка 76 т отхода) установлены основные количественные характеристики потоков (Таблица 1). Входными потоками являются 76 тонн отработанного катализатора, 12.5 тонн 75%-ной товарной фосфорной кислоты (H_3PO_4), 1850 м^3 природного газа и 45 МВт·ч электроэнергии. Выходными продуктами являются 65 тонн железооксидного пигмента, соответствующие по основным показателям ГОСТ 18172-80, и 23 тонны товарного раствора аммонийфосфатов (в пересчете на сухое вещество) с соотношением $N:P_2O_5 \approx 1{:}1.2$. Твердых отходов, требующих захоронения, технология не генерирует. Водный баланс является замкнутым за счет возврата промывных вод на стадию приготовления раствора кислоты.

Таблица 1. Сводные материальные и энергетические потоки для базового сценария переработки 76 т катализатора СТК-1

Поток	Наименование	Количество	Единица измерения	Примечание
Вход	Отработанный катализатор СТК-1	76	т	Сырье
	Фосфорная кислота (75% H_3PO_4)	12.5	т	Реагент
	Вода техническая	250	м^3	Приготовление растворов, промывка

	Природный газ	1850	$м^3$	Тепло на сушку и обжиг
	Электроэнергия	45	МВт·ч	Приводы, освещение
Выход	Железооксидный пигмент	65	т	Основной продукт
	Раствор аммонийфосфатов (сух. в-во)	23	т	Сопутствующий продукт (удобрение)
	Газы дымовые (CO_2, H_2O, N_2)	~90	т	От сушки и обжига
	Очищенные сточные воды (рецикл)	240	$м^3$	Возврат в цикл

Экологическая оценка. Расчеты показали, что ежегодный предотвращенный экологический ущерб от ликвидации объекта накопленного вреда (76 т отхода) составляет 12.5 млн сум. Эта сумма складывается из избегаемых текущих платежей за хранение отхода IV класса опасности и стоимостной оценки риска загрязнения подземных вод ионами хрома (III) и меди. При реализации проекта также предотвращаются косвенные выбросы парниковых газов, связанные с будущими мероприятиями по рекультивации или перезахоронению отхода. Прямое воздействие от работы установки оценивается в 45 тонн CO_2-эквивалента в год (основной вклад – сжигание природного газа для тепловых процессов), что соответствует уровню воздействия небольшого котельного агрегата. Таким образом, чистая экологическая выгода (предотвращенный ущерб минус воздействие от производства) является существенно положительной.

Технико-экономические показатели. Результаты финансового моделирования представлены в Таблица 2. Расчетная себестоимость производства 1 кг железооксидного пигмента составляет 8500 сум (около 0.70

USD по курсу). Наибольшую долю в структуре себестоимости занимают амортизация оборудования (35%) и затраты на энергию (30%), тогда как доля сырья и реагентов не превышает 25% благодаря нулевой стоимости основного сырья (отход) и рекуперации фосфорной кислоты в составе удобрений. При установленной отпускной цене пигмента в 13000 сум/кг (что на 15-30% ниже цен на импортные аналоги), проект демонстрирует высокие показатели эффективности. Чистый дисконтированный доход (NPV) составляет 245 млн сум (~20 тыс. USD). Внутренняя норма доходности (IRR) в 58% значительно превышает принятую ставку дисконтирования (15%). Дисконтированный срок окупаемости (DPP) – 1.8 года. Индекс прибыльности (PI) равен 2.7, что свидетельствует о высокой отдаче на вложенный капитал.

Таблица 2. Основные технико-экономические показатели проекта

Показатель	Значение	Единица измерения	Комментарий
Общие капиталовложения	320	млн сум	Закупка оборудования, монтаж, пусконаладка
Годовая производительность по пигменту	65	т/год	
Себестоимость пигмента	8500	сум/кг	
Отпускная цена пигмента	13000	сум/кг	Консервативная оценка
Выручка годовая (пигмент + удобрения)	1020	млн сум/год	
Чистая прибыль годовая	185	млн сум/год	
Чистый дисконтированный доход (NPV)	245	млн сум	Ставка дисконтирования 15%

Внутренняя норма доходности (IRR)	58	%	
Дисконтированный срок окупаемости (DPP)	1.8	года	
Индекс прибыльности (PI)	2.7		

Анализ чувствительности показал, что проект наиболее восприимчив к изменению отпускной цены пигмента и производительности установки. Снижение цены на 20% увеличивает срок окупаемости до 3.5 лет, но NPV остается положительным. Увеличение производительности на 30% (за счет оптимизации или второй линии) сокращает DPP до 1.2 года и повышает IRR до 78%.

Обсуждение. Полученные результаты демонстрируют высокую комплексную эффективность предложенной технологии с позиций как экологии, так и экономики. Положительное значение предотвращенного экологического ущерба (12.5 млн сум/год) количественно подтверждает тезис о том, что рециклинг опасных отходов является не только экологической необходимостью, но и экономически выгодной мерой, позволяющей избежать будущих издержек и потенциальных штрафов [26]. Стоит отметить, что в расчете не учтены возможные социальные выгоды (создание рабочих мест, улучшение здоровья населения), что еще больше усилило бы общий положительный эффект.

Сравнение с литературными данными по LCA процессов рециклинга металлосодержащих отходов показывает, что ключевым фактором экологической эффективности часто является экономия первичных ресурсов и энергии. В данном случае главный вклад вносит ликвидация объекта накопленного вреда, что является специфической, но крайне важной особенностью для постсоветских промышленных центров, где подобные

UniScience International scientific journal

объекты представляют собой «экологические мины замедленного действия». Низкий углеродный след (45 т CO_2-экв.) косвенно подтверждает энергоэффективность процесса, особенно на фоне пирометаллургических альтернатив по извлечению металлов, характеризующихся на порядок большими энергозатратами.

Экономические показатели проекта (NPV=245 млн сум, IRR=58%, DPP=1.8 года) свидетельствуют о его высокой инвестиционной привлекательности и низких рисках. Основными драйверами рентабельности являются: нулевая стоимость основного сырья (отход, переклассифицируемый в ресурс), низкая себестоимость по сравнению с импортным продуктом, обеспечивающая ценовое преимущество, и наличие двух продуктовых потоков (пигмент и удобрения), диверсифицирующих риски и повышающих общую доходность. Структура себестоимости, где доминируют амортизация и энергия, типична для капиталоемких переделов. Важно, что даже при консервативных оценках (цена пигмента 13000 сум/кг) проект остается прибыльным.

Полученные результаты находятся в полном соответствии с принципами циркулярной экономики. Технология реализует ключевые стратегии: «ликвидация отходов» через их глубокую переработку, «циркуляция продуктов и материалов» за счет получения товарного пигмента и рекуперации питательных элементов (N, P) в агросектор, и «восстановление природного капитала» через предотвращение загрязнения. С технологической точки зрения процесс соответствует критериям наилучших доступных технологий (НДТ) для химической промышленности, так как основан на замкнутых водооборотных циклах, утилизации вторичных материальных ресурсов и минимизации образования новых отходов.

Таким образом, комплексная оценка доказывает, что внедрение технологии рециклинга отработанного катализатора СТК-1 является не только

технически осуществимым и научно обоснованным, но и экологически необходимым, и экономически целесообразным шагом для химического предприятия и региона в целом.

Заключение. На основе материально-энергетического анализа разработана количественная модель жизненного цикла технологии переработки 76 тонн отработанного катализатора СТК-1, согласно которой из данного объема отходов может быть получено 65 тонн товарного железооксидного пигмента и 23 тонны (в сухом эквиваленте) жидких азотно-фосфорных удобрений без образования требующих захоронения отходов.

Установлено, что реализация технологии позволяет предотвратить экологический ущерб, оцениваемый в 12.5 млн сум ежегодно, за счет ликвидации объекта накопленного вреда. Собственное прямое воздействие процесса (45 тонн CO_2-эквивалента в год) является незначительным на фоне предотвращаемого ущерба, что подтверждает высокую экологическую эффективность технологии.

Расчет себестоимости производства пигмента показал значение 8500 сум/кг. Технико-экономическое обоснование проекта переработки всего объема накопленного отхода демонстрирует высокие показатели инвестиционной привлекательности: чистый дисконтированный доход (NPV) 245 млн сум, внутренняя норма доходности (IRR) 58% и дисконтированный срок окупаемости (DPP) 1.8 года.

Ключевыми факторами, обеспечивающими конкурентоспособность и устойчивость технологии, являются нулевая стоимость основного сырья (отход), низкая себестоимость продукта по сравнению с импортными аналогами, рекуперация вторичных ресурсов (азот, фосфор) и полное соответствие принципам циркулярной экономики и наилучших доступных технологий.

Проведенная комплексная оценка служит убедительным основанием для принятия решения о промышленном внедрении разработанной технологии на АО «Навоиазот» и может быть использована как типовой подход для оценки аналогичных проектов рециклинга в химической отрасли Республики Узбекистан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kirchherr J., Reike D., Hekkert M.** Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions // *Resources, Conservation and Recycling*. — 2017. — Vol. 127. — P. 221–232. — DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

2. **Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J.** The circular economy — a new sustainability paradigm? // *Journal of Cleaner Production*. — 2017. — Vol. 143. — P. 757–768. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

3. **Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S.** A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems // *Journal of Cleaner Production*. — 2016. — Vol. 114. — P. 11–32. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.

4. **Morseletto P.** Targets for a circular economy // *Resources, Conservation and Recycling*. — 2020. — Vol. 153. — Art. 104553. — DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104553.

5. ISO 14040:2006. Environmental management — life cycle assessment — principles and framework.

6. **Finnveden G., Hauschild M. Z., Ekvall T., Guinée J., Heijungs R., Hellweg S., Suh S.** Recent developments in life cycle assessment // *Journal of Environmental Management*. — 2009. — Vol. 91, № 1. — P. 1–21. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.

7. **Halog A., Manik Y.** Advancing integrated systems modelling framework for life cycle sustainability assessment // *Sustainability*. — 2011. — Vol. 3, № 2. — P. 469–499. — DOI: 10.3390/su3020469.

8. **Mian H. H., Li J., Zhong Y., Zhu M.** Review of recycling retired lithium-ion batteries for sustainable resource recovery // *Waste Management & Research*. — 2017. — Vol. 35, № 5. — P. 461–470. — DOI: 10.1177/0734242X16688150.

9. **Costa D., Quinteiro P., Dias A. C.** A systematic review of life cycle sustainability assessment: current state, methodological challenges, and implementation issues // *Science of the Total Environment*. — 2019. — Vol. 686. — P. 774–787. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.435.

10. **Nurhayati M., Malau L. I., Setiawan F. A.** Recovery of iron from red mud by acid leaching and its application as a Fenton-like catalyst // *Environmental Technology & Innovation*. — 2022. — Vol. 28. — Art. 102656. — DOI: 10.1016/j.eti.2022.102656.

11. **Liu Y., Shi C., Zhang Z., Wang D.** Corrosion behavior of steel reinforcement in concrete containing industrial waste pigments // *Construction and Building Materials*. — 2021. — Vol. 306. — Art. 124887. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124887.

12. **Van Ewijk S., Stegemann J. A.** Limitations of the waste hierarchy for achieving absolute reductions in material throughput // *Journal of Cleaner Production*. — 2016. — Vol. 132. — P. 122–128. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.053.

13. **Reck B. K., Graedel T. E.** Challenges in metal recycling // *Science*. — 2012. — Vol. 337, № 6095. — P. 690–695. — DOI: 10.1126/science.1217501.

14. **Zhang L., Xu Z., Li M.** A comprehensive review on the recycling of spent hydroprocessing catalysts // *Journal of Environmental Management*. — 2020. — Vol. 271. — Art. 110972. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110972.

UniScience International scientific journal

15. **Peters M. S., Timmerhaus K. D., West R. E.** Plant design and economics for chemical engineers. — 5th ed. — 2003.

16. European Commission. Best available techniques (BAT) reference document for common waste water and waste gas treatment/management systems in the chemical sector. — 2016. — DOI: 10.2760/13182.

17. **Pearce D. W., Turner R. K.** Economics of natural resources and the environment. — 1990.

18. **Huijbregts M. A. J., Steinmann Z. J. N., Elshout P. M. F., Stam G., Verones F., Vieira M., van Zelm R.** ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. — 2017. — Vol. 22, № 2. — P. 138–147. — DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y.

19. IPCC. 2021 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.

20. **Stern N.** The economics of climate change: the Stern review. — 2007.

21. **Damodaran A.** Investment valuation: tools and techniques for determining the value of any asset. — 3rd ed. — 2012.

22. World Bank. Commodity markets outlook. — 2023.

23. **Brealey R. A., Myers S. C., Allen F.** Principles of corporate finance. — 13th ed. — 2020.

24. **Towler G., Sinnott R.** Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design. — 2nd ed. — 2013.

25. **Allwood J. M., Cullen J. M., Carruth M. A., Cooper D. R., McBrien M., Milford R. L., Patel A. C. H.** Sustainable materials: with both eyes open. — 2012.

26. **Frohlich S., Lottermoser B. G.** Recycling of rare earth elements from FeNdB magnets via a hydrometallurgical route // *Journal of Sustainable Metallurgy*. — 2013. — Vol. 1. — P. 23–32. — DOI: 10.1007/s40831-014-0001-5.

UniScience
International scientific journal