

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ И РЕЦИКЛИНГ ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ: ТЕХНОЛОГИИ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

А.Н. Хотько

Анатолий Николаевич Хотько

Белорусский государственный колледж промышленности строительных материалов, ул. Гурского, 21, Минск, 220052, Беларусь

E-mail: bgkpsm@belstu.by

В данной работе рассматривается рециклинг гипсосодержащих отходов стекольной промышленности. Проведен предварительный экологический анализ отходов, образующихся при нейтрализации растворов химической полировки хрусталя, определены основные химические показатели: pH, влажность, содержание неорганических ионов. Предложена технологическая цепочка переработки, включающая извлечение, сушку и транспортировку отходов.

Ключевые слова: рециклинг, отходы, экологический менеджмент, индекс прибыльности, дисконтированный доход.

ENVIRONMENTAL MANAGEMENT AND RECYCLING OF GYPSUM-CONTAINING WASTE: TECHNOLOGY AND ECONOMIC PROSPECTS

A.N. Khotko

Anatoly N. Khotko

Belarusian State College of Construction Materials Industry, Gursky Str. 21, Minsk, 220052, Belarus

E-mail: bgkpsm@belstu.by

This paper examines the recycling of gypsum-containing waste from the glass industry. A preliminary ecological analysis of the waste generated during the neutralization of crystal chemical polishing solutions has been carried out, and the main chemical parameters have been determined: pH, humidity, and the content of inorganic ions. A technological processing chain is proposed, which includes the extraction, drying and transportation of waste.

Keywords: recycling, waste, environmental management, profitability index, present value.

Для цитирования:

Хотько А.Н. Экологический менеджмент и рециклинг гипсосодержащих отходов: технологии и экономические перспективы. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2025. № 02(64). С. 52-59. DOI: 10.6060/ivecofin.2025642.722

For citation:

Khotko A.N. Environmental management and recycling of gypsum-containing waste: technology and economic prospects. *Ivecofin*. 2025. N 02(64). P. 52-59. DOI: 10.6060/ivecofin.2025642.722 (in Russian)

ВВЕДЕНИЕ

Отвалы промышленных переработок природного сырья постоянно пополняются и принимают масштабы, угрожающие устойчивому функционированию биоценозов. Отвал также является источником гидродинамического воздействия на окружающую среду, вызывая изменение уровня грунтовых вод, что приводит к негатив-

ным явлениям в селитебной зоне, таким как отчуждение и загрязнение земельных участков, трансформация природного ландшафта [1-7].

В качестве экономического инструмента в сфере природопользования и охраны окружающей среды установлен экологический налог, налог за добычу (изъятие) природных ресурсов, а также земельный налог.

Объектами налогообложения экологическим налогом признаются [8]:

1. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух и (или) суммарные показатели загрязняющих веществ, указанные в разрешениях на выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух или комплексных природоохранных разрешениях;
2. Сброс сточных вод в окружающую среду на основании разрешений на специальное водопользование или комплексных природоохранных разрешений;
3. Хранение отходов производства;
4. Захоронение отходов производства или использование отходов производства в качестве изолирующего слоя на объектах захоронения отходов.

Поэтому проблема утилизации отходов производства остается актуальной задачей.

Активная экологическая деятельность может привести к значительным финансовым выгодам, связанным со снижением затрат на переработку отходов. Предварительный экологический анализ является первым шагом при внедрении системы экологического менеджмента [9, 10].

Под экологическим менеджментом подразумевается ряд взаимосвязанных процессов управления технологическими стадиями, которые могут повлиять на окружающую среду, причинить ей вред.

Гипотеза приводимого исследования заключается в том, что разработка и внедрение новых технологий рециклинга гипсосодержащих отходов, образующихся в стекольной промышленности, с учётом их химического состава, позволит не только минимизировать экологический ущерб производства, но и создать экономически рентабельные продукты вторичного использования.

Цель работы - провести предварительный экологический анализ отходов, образующихся при полировке хрусталя для внедрения системы экологического менеджмента.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Определены физико-химические показатели образцов отходов;
2. Разработана технологическая схема рециклинга данного вида отходов;
3. Рассчитаны основные экономические показатели эффективности внедрения принципов экологического менеджмента.

Новизна работы заключается в использовании комплексного подхода, заключающегося в анализе физико-химических свойств отходов и оценке их потенциала для рециклинга.

МЕТОДЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Первый этап исследований - подготовка образцов для проведения анализа, определение влажности и кислотности проб, определение неорганических ионов методом капиллярного электрофореза.

Для исследования были отобраны 6 проб образцов отходов (табл. 1).

Проведение измерений. Проба вводилась в капилляр, заполненный ведущим электролитом пневматическим способом ($P = 30$ мбар, 5 секунд), напряжение на концах капилляра составляло $+10,0$ кВ (для определения катионов); $-15,0$ кВ (для определения анионов). Идентификация анализируемых катионов проводилась косвенным методом. Количественное определение катионов и анионов в пробе проводилось методом градуировочного графика. Случайная погрешность определения оценивалась как результат статистической обработки выборки из 5 параллельных определений для одной и той же пробы ($P = 0.95$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлена информация об образцах.

Таблица 1. Характеристика образцов
Table 1. Characteristics of the samples

Образец	Шламохранилище	Глубина, м
1	Не действует	1,5
2	Не действует	2
3	Не действует	3
4	Действует	0
5	Действует	1
6	Действует	1,5

Влажность материала характеризуется тем количеством воды, которое содержится в порах и адсорбировано на поверхности образца. Потери при прокаливании характеризуют количество органических веществ и наличие химически связанной воды. Результаты анализа представлены в табл. 2.

Как видно из представленных данных значение pH водных вытяжек отходов имеет одинаковое значение и не зависит от времени хранения и глубины залегания. Влажность образцов осадков находится в пределах от 30 до 59%, при этом влажность отходов с шламохранилища, которое не эксплуатируется, в 1,5 раза ниже, чем в эксплуатируемом шламохранилище.

Результаты определения неорганических ионов методом капиллярного электрофореза представлены в табл. 3.

Таблица 2. Результаты определения влажности и pH анализируемых образцов
Table 2. Results of determination of humidity and pH of the analyzed samples

№ пробы	1	2	3	Среднее значение	4	5	6	Среднее значение
W, %	32,4	35,9	29,5	32,6	58,5	47,2	45,3	50,3
pH	7,96	7,95	7,94	7,95	7,96	7,94	7,96	7,95
п.п.п., %	11,1	7,7	9,6	9,8	10,7	12,3	11,0	7,55

Таблица 3. Результаты определения неорганических ионов методом капиллярного электрофореза
Table 3. Results of determination of inorganic ions through capillary electrophoresis

Показатели	1 проба	2 проба	3 проба	4 проба	5 проба	6 проба
Катионы						
	Концентрация, мг/л					
Аммоний (NH_4^+)	3.833	0.9187	1.5165	6.653	1.982	1.4055
Калий (K^+)	6.025	6.395	6.6	9.0565	9.134	5.5415
Натрий (Na^+)	17.74	13.665	12.71	19.11	11.675	12.395
Магний (Mg^{2+})	16.835	15.535	16.22	18.945	14.4665	14.41985
Свинец (Pb^{2+})	1.1515	1.11785	0.7632	1.00685	1.011	1.0295
Кальций (Ca^{2+})	508.85	412.45	384.95	508.25	597.95	428.65
Анионы						
	Концентрация, мг/л					
Хлорид (Cl^-)	3.9595	0.32415	0.15375	1.153	0.6974	0.2504
Сульфат (SO_4^{2-})	361.9	221.05	149.0	359.1	252.75	203.4
Нитрат (NO_3^-)	1.1285	-	-	0.51995	-	-
Фторид (F^-)	1.705	0.53755	0.35835	1.277	1.00635	1.046

Как видно из представленной информации, наблюдается зависимость уменьшения концентрации водорастворимых компонентов отходов с увеличением глубины как в действующем, так и недействующем накопителе. При этом в недействующем накопителе градиент изменения концентраций более значительный, что может быть связано с более длительным воздействием внешних факторов на отходы в накопителе.

Присутствует незначительная примесь ионов Pb^{2+} . В состав хрустала может входить до 13-23% PbO . Поэтому при полировке хрустала незначительная часть соединений Pb^{2+} может переходить в раствор, после чего в шлам нейтрализации. В состав шлама входят преимущественно ионы Ca^{2+} , SO_4^{2-} . Это вызвано тем, что нейтрализацию отработанных растворов химической полировки производят известью. Содержание ионов F^- вызвано образованием CaF_2 в шламе.

Содержание ионов Ca^{2+} (384,95-597,95 мг/л) и SO_4^{2-} (149-361,9 мг/л) в исследуемых отходах соответствует требованиям для использования в качестве регулятора процесса схватывания цемента (ГОСТ 31108-2020, где допустимое содержание сульфатов – до 3,5%). Однако наличие

подвижных форм свинца(II) (0,7632-1,1515 мг/л) превышает предельно допустимые концентрации для воды хозяйственно-питьевого водопользования (СанПиН 2.1.7.573-96 - до 0,03 мг/кг), что требует дополнительной очистки. Однако не превышает значения ориентировочно допустимой концентрации в почвах (32 мг/кг). Влажность отходов (30-59%) также превышает технологические нормы для цементных смесей (не допускается наличие свободной влаги), что подтверждает необходимость тщательной сушки отходов.

Вторым этапом являлось рассмотрение основы общей теории рециклинга данного вида отходов.

Рециклинг определяется как сеть циклов, в которой отход является одним из состояний материального объекта на одной из стадий его жизненного цикла (ЖЦ). Объекты управления – процессы в элементах сети рециклинга (СР) и сами сети. Под элементами понимаются производственные, потребительские и регенерационные единицы, под связями – непрерывные и дискретные потоки веществ, материалов, изделий. Сеть циклов в силу системного свойства эмерджентности приобретает свойства, не присущие её от-

дельным элементам. Возникают новые эффекты, способствующие формированию метапромышленности рециклинга.

Выделяют следующие технологии рециклинга [11, 12]:

1. Базисные технологии рециклинга - функционирующие в широком диапазоне колебаний состава основного сырья и способные вовлечь в переработку или для использования отходы извне.
2. Сателлитные технологии рециклинга - дополняющие технологии-источники отходов (базисные технологии), переработка отходов интегрируется в специфическую часть производственного комплекса.
3. Автономные технологии - создаваемые исключительно для решения проблемы отходов без интеграции с базовыми технологиями.
4. Гибридные технологии - для совместной переработки промышленных и коммунальных отходов. Существуют тенденции увеличения числа гибридных технологий и трансформации базисных технологий в гибридные.
5. Ассимиляционные технологии - обеспечивающие экологически безопасный вывод материальных потоков из техногенных в природные циклы с полезным эффектом.

На рис. 1 представлены варианты рециклинга гипсосодержащих отходов.



Рисунок 1. Варианты рециклинга гипсосодержащих отходов
Figure 1. Options for recycling gypsum-containing waste

Первым вариантом возможного использования данного вида отходов является в качестве добавки к портландцементу, так как портландцемент представляет собой гидравлическое вяжущее вещество, получаемое путём совместного помола цементного клинкера, гипса и добавок, в составе которого преобладают силикаты кальция (70-80%). Гипс играет ключевую роль в регулировании времени схватывания цемента. Недостаток гипса приводит к быстрому схватыванию (менее 45 минут), что делает цемент непригодным для использования. Избыток гипса увеличивает время схватывания, что также затрудняет строительные работы. Оптимальное содержание гипса зависит от состава клинкера и обычно находится в диапазоне 3-5% [13, 14]. Для каждого конкретного типа цемента существует свое значение нормативного содержания гипса, которое определяется экспериментально.

Альтернативным применением отходов видится их использование в составе дорожного асфальтобетона в виде минерального порошка [15, 16]. Доля техногенного гипса в асфальтобетонных смесях может составлять до 4%. Создание монолитных слоев с использованием техногенного гипса представляется целесообразным решением для строительства дорожных покрытий, позволяющим заменить традиционные, более дорогие материалы. Применение гипсовых слоев в основании препятствует проникновению атмосферных осадков в конструкцию земляного полотна. Как следствие, влажность грунта в рабочей зоне земляного полотна значительно снижается по сравнению с использованием обычных материалов и песчаной дренажной подушки.

Еще одним вариантом является применение отходов для производства гипсового вяжущего [14]. Внедрение этой технологии позволит существенно уменьшить негативное воздействие на окружающую среду, в частности, снизить загрязнение почвы, атмосферы, а также водных ресурсов и подземных горизонтов.

Проведя анализ возможных сетей и технологий рециклинга гипсосодержащих отходов, предлагаем следующую технологическую цепочку переработки данного вида отходов (рис. 2).

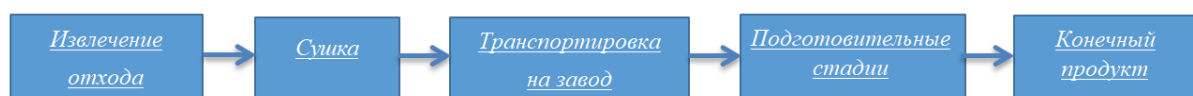


Рисунок 2. Технологическая цепочка переработки отходов
Figure 2. Technological chain of waste recycling

Предполагаемые этапы рециклинга гипсодержащих отходов стекольной промышленности включают следующие этапы:

- Извлечение: извлечение гипсодержащих отходов будет проводиться с полигона, расположенного в 1 км от завода. Транспортировку отходов на перерабатывающий завод предполагается осуществлять грузовиками.
- Сушка. Влажность отходов может достигать до 40–50%. Поэтому, для их использования в изготовлении стройматериалов необходимо проводить сушку. Сушку отходов можно проводить на мощностях стекольного завода.
- Далее высушенные отходы могут быть направлены на цементные заводы, где могут использоваться в качестве добавок при производстве портландцемента.
- Упаковка и хранение конечного продукта.

- Распределение и транспортировка конечного продукта потребителю.

Также данные отходы могут быть использованы для изготовления гипсового вяжущего. В этом случае рециклинг будет включать следующие стадии:

- Извлечение.
- Сушка.
- Транспортировка на завод изготовитель гипса.
- Обжиг: Обжиг проводится во вращающейся печи прямым нагревом.
- Помол и сепарация.
- Упаковка и хранение конечного продукта;
- Распределение и транспортировка конечного продукта потребителю.

Расчет по оборудованию представлен в табл. 4.

Таблица 4. Расчет количества и стоимости оборудования
Table 4. Calculation of the quantity and cost of equipment

Оборудование	Количество единиц	Цена за единицу, руб.	Общая стоимость, руб.
Сушильный барабан	1	100000	100000
Автоклав	1	50000	50000
Итого		150000	
Прочее неучтенное оборудование (10%)	–	–	15000
Итого (стоимость оборудования)		165000	
Транспортно-заготовительные и монтажные расходы (20%)	–	–	33000
Инструмент, инвентарь (3%)	–	–	4950
Всего капитальных затрат на оборудование		202950	

Цена единицы оборудования принимается по данным предприятия. Расчет стоимости оборудования производится на основании спецификации согласно технологической схеме процесса и цен на него. Общая величина капитальных вложений в оборудование определяется по формуле:

$$K_{об} = \sum_{i=1}^n K_i \cdot C_i \cdot K_{тр} \cdot K_m$$

где K_i – количество названий оборудования;

i – цена приобретения i -ого вида оборудования, руб. (цена, действующая на время расчетов);

$K_{тр}$ – коэффициент, учитывающий транспортные расходы;

K_m – коэффициент, учитывающий расходы на монтаж, наладку и пуск оборудования.

В смету обычно включают и стоимость неучтенного оборудования, составляющую 10-15% от суммарной стоимости учтенного оборудования. Транспортные расходы составляют 8-

10% от общей стоимости оборудования, расходы на монтаж – 15-20%, инструмент и т.д.

Общая сумма капитальных затрат на строительство природоохранного объекта определяется по формуле:

$$K = C_{стр} + K_{об} + (C_{стр} + K_{об}) \cdot 0,35$$

где $C_{стр}$ – затраты на строительство, руб.;

$K_{об}$ – общая величина капитальных вложений в оборудование, руб.

При рассмотрении эффективности рециклинга следует исходить из оценки экономической и экологической составляющих использования ресурсов, с учетом наличия и объемов тех или иных отходов на исследуемых территориях. Значение индекса эффективности рециклинга лежит в диапазоне от 0,01 до 1, а его увеличение означает рост эффективности рециклинга:

$$I_{er} = F(E, E_c, M) \rightarrow 1,0$$

где I_{er} – индекс эффективности рециклинга;

E – показатель экономической эффективности рециклинга;

Ес – показатель экологической значимости рециклинга;

М – показатель относительного объема, предполагаемого рециклинга

Также в качестве основных показателей, которые характеризуют эффективность предлагаемых направлений рециклинга отходов, являются:

- чистый дисконтированный доход;
- индекс доходности;
- срок окупаемости капитальных вложений.

Расчет чистого дисконтированного дохода проводится при нормативной ставке дисконтирования $E_1 = 0,12$ и при $E_2 = 0,20$ (табл. 5).

Рассчитаем показатели экономической эффективности природоохранных мероприятий с учетом фактора времени. Настоящая стоимость определяется по формуле:

$$НС = БС \cdot (1 + E)^T$$

где БС – будущая стоимость;

Е – ставка дисконтирования;

Т – период, в который осуществляется инвестиции и эксплуатируется оборудование.

Таблица 5. Расчет чистого дисконтированного дохода, руб.

Table 5. Calculation of net present value, rub

Год	Капитальные вложения, руб.	Экономия руб.	Настоящая стоимость, руб.		ЧДД, руб.	
			Е=0,12	Е=0,20	Е=0,12	Е=0,20
0	273950	-	-		-273950,000	-273950,000
1	-	92879	82940,947	77368,207	-191009,053	-196581,793
2	-	92879	74024,563	64458,026	-116984,490	-132123,767
3	-	92879	66129,848	53776,941	-50854,642	-78346,826
4	-	92879	59071,044	44767,678	8216,402	-33579,148
5	-	92879	52662,393	37337,358	60878,795	3758,210
6	-	92879	47089,653	31114,465	107968,448	34872,675
7	-	92879	41981,308	25913,241	149949,756	60785,916
8	-	92879	37523,116	21640,807	187472,872	82426,723
9	-	92879	33529,319	18018,526	221002,191	100445,249
10	-	92879	29907,038	15232,156	250909,229	115677,405
Итого	273950,000	928790,0	524859,229	389627,405	-	-

Индекс прибыльности (I_n) определяется как отношение разности дохода и затрат при реализации мероприятия к величине капитальных вложений. Мероприятие считается экономически эффективным, если $I_n > 1$.

Индекс прибыльности данного мероприятия составил:

$$I_n = 524859,229 / 273950 = 1,95$$

$$I_n > 1.$$

Динамический срок окупаемости T_d определяет фактический период времени, в течение которого капитальные вложения покрываются суммарными доходами от внедренного мероприятия, т.е. фактический срок возможного возврата кредита или других заемных инвестиций. Иногда его называют сроком возмещения или возврата затрат. Динамический срок окупаемости определим графическим методом. Для этого построим финансовый профиль инвестиционного проекта, отражающий график зависимости накопленной ЧДД от времени с начала реализованного проекта (рис. 3).

Из графика видно, что срок окупаемости проекта определяется в точке пересечения графика ЧДД с осью абсцисс. Срок окупаемости равен 3,9 года.

Система управления переработкой отходов не должна ограничиваться стадией их образования и сбора, а должна охватывать все стадии жизненного цикла (предынвестиционная, инвестиционная, эксплуатационная и ликвидационная). Особая роль при этом принадлежит прединвестиционной фазе, на которой рассматриваются вопросы изучения вида, состава отхода, технологии его получения, технологии и способов переработки и дальнейшего использования.

ОГРАНИЧЕНИЯ И РИСКИ

Ключевым ограничением предложенных способов рециклинга гипсосодержащих отходов производства хрустали является присутствие в их составе соединений свинца, ионы которых могут мигрировать в окружающую среду при использовании переработанных материалов. Например, применение отходов в дорожном асфальтобетоне требует изучения процесса выщелачивания свинца под воздействием атмосферных осадков. Для минимизации рисков необходима предварительная очистка отходов методами ионного обмена или осаждения. Кроме того, высокая влажность отходов увеличивает энергозатраты на сушку, что может снизить экономическую эффективность рециклинга. Дополнительные ис-

следования должны будут направлены на изучение долговременной стабильности материалов, изготовленных из данного типа отходов продук-

ции, уменьшения содержания свинца в отходах, а также работку технологий, сочетающих очистку и переработку свинецсодержащих отходов.

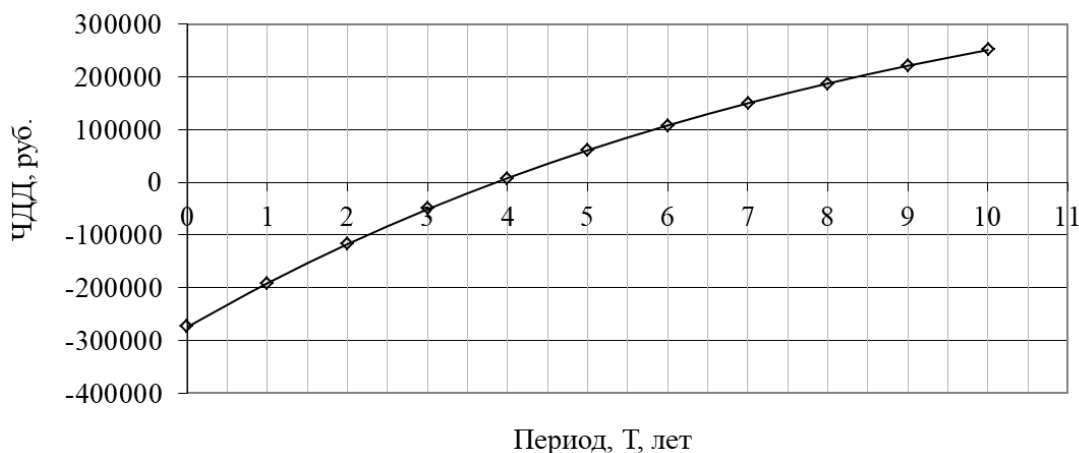


Рисунок 3. График зависимости накопленной ЧДД от времени с начала реализации проекта
Figure 3. Graph of the dependence of accumulated NPV on time since the beginning of the implemented project

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований установлена возможность рециклинга гипсосодержащих отходов стекольной промышленности. Проведённый анализ физико-химических свойств и состава отходов показал, что отходы характеризуются влажностью 30-50%, pH 7.6-7.9 и содержат ионы Ca^{2+} , SO_4^{2-} , NH_4^+ , K^+ , а также следы Pb^{2+} , что связано с составом хрусталя. На основе полученных проведённых исследований предложены три ключевых направления рециклинга данного типа отходов: использование отходов в качестве добавки к портландцементу, компонента дорожного асфальтобетона и сырья для гипсового вяжущего.

Однако для успешной реализации рециклинга гипсосодержащих отходов полировки хрусталя необходимо решить вопросы очистки отходов от примесей свинца и оптимизировать технологии их переработки. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку методов глубокой очистки и интеграцию гибридных технологий для повышения эффективности переработки. Результаты работы указывают на важность достижения баланса между экологическими и экономическими целями.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сатыбалдиева А.Н., Таймасов Б. Разработка технологических схем производства цемента с использованием минеральных отходов ЮКО. *Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова*. 2018. № 1. С. 118-123.
2. Комащенко В.И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2015. № 4. С. 23-30.
3. Лаврова К.А., Павлова Е.А. Исследование особенностей обращения с отходами на территории России и за рубежом. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2023. № 3(57). С. 98-104. DOI: 10.6060/ivecofin.2023573.658.
4. Лаврова К.А., Павлова Е.А. Инновационные подходы к сбору и утилизации линз: перспективы и вызовы. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2024. № 2(60). С. 41-45. DOI: 10.6060/ivecofin.2024602.682.
5. Колобов М.Ю., Братков И.В., Гущина Т.В., Чагин О.В. Энерго- и ресурсосберегающая технология получения сферического графита. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2023. № 2(74). С. 79-87. DOI: 10.6060/snt.20237402.0008.

REFERENCES

1. Satybaldieva A.N., Taimasov B. Development of technological schemes for cement production using mineral waste of South Kazakhstan region. *Scientific works of SKSU named after M. Auezov*. 2018. N 1. P. 118-123 (in Russian).
2. Komashchenko V.I. Environmental-economical expediency of utilizing mining-industrial waste for their converting. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2015. N 4. P. 23-30 (in Russian).
3. Lavrova K.A., Pavlova E.A. Study of the peculiarities of waste management in Russia and abroad. *Ivecofin*. 2023. N 3(57). P. 98-104. DOI: 10.6060/ivecofin.2023573.658 (in Russian).
4. Lavrova K.A., Pavlova E.A. Innovative approaches to contact lenses collection and recycling: prospects and challenges. *Ivecofin*. 2024. N 2(60). P. 41-45. DOI: 10.6060/ivecofin.2024602.682 (in Russian).
5. Kolobov M.Yu., Bratkov I.V., Gushchina T.V., Chagin O.V. Energy and resource-saving technology production of spherical graphite. *Modern high technologies. Regional application*. 2023. N 2(74). P. 79-87. DOI: 10.6060/snt.20237402.0008 (in Russian).

6. Колобов М.Ю., Силин А.М., Морозов М.П. и др. Использование центробежной мельницы для измельчения извести. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. № 4(80). С. 111-114. DOI: 10.6060/snt.20248004.00015.
7. Макаревич Е.А., Папин А.В., Черкасова Т.Г. Кинетические характеристики процессов термолитиза отходов резинотехнических изделий. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2024. Т. 67. № 5. С. 107-113. DOI: 10.6060/ivkkt.20246705.6937.
8. Налоговый кодекс Республики Беларусь (Особенная часть). <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=hk0900071>.
9. Феденя В.М., Докурно Г.С. Порядок проведения предварительного экологического анализа деятельности организаций. *Экологический вестник*. 2011. № 1. С. 139-145.
10. Царук А.Ю. Методические и организационные основы проведения предварительного экологического анализа на железорудных горно-обогатительных предприятиях. *Экономика развития*. 2013. № 3. С. 86-89.
11. Дубровенко Д.И., Старыгин Л.А., Липунов И.Н. Ресурсосберегающие технологии рециклинга отходов магниевого производства. В сб. «Химия. Экология. Урбанистика» Всерос. н.-пр. конференции молодых ученых. Пермь: ПНИПУ. 2017. С. 477-484.
12. Быков Д.Е. и др. Разработка научных основ управления отходами предприятий химической и нефтехимической отрасли. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016. Т. 18. № 4-5. С. 886-892.
13. Сарн М. Применение в строительстве сульфата кальция и улучшение его свойств. *Цемент и его применение*. 2009. № 2. С. 112-116.
14. Chernysh Y. et al. Phosphogypsum recycling: a review of environmental issues, current trends, and prospects. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. N 4. P. 1575.
15. Кочетков А.В. и др. Устройство слоев транспортных сооружений из фосфогипса полугидрата (отходо-побочного продукта производства азотно-фосфорных удобрений). *Транспортные сооружения*. 2019. Т. 6. № 1. С. 1-10. DOI: 10.15862/18SATS119.
16. Жантасов К.Т. и др. Использование техногенных отходов для дорожной одежды коробчатого типа. *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. 2017. № 2 (199). С. 170-175.
6. Kolobov M.Yu., Silin A.M., Morozov M.P. et al. Using a centrifugal mill for grinding lime. *Modern high technologies. Regional application*. 2024. N 4(80). P. 111-114. DOI: 10.6060/snt.20248004.00015 (in Russian).
7. Makarevich E.A., Papin A.V., Cherkasova T.G. Kinetic characteristics of thermolysis processes of waste rubber products. *ChemChemTech*. 2024. Vol. 67. N 5. P. 107-113. DOI: 10.6060/ivkkt.20246705.6937 (in Russian).
8. The Tax Code of the Republic of Belarus (Special part). <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=hk0900071> (in Russian).
9. Fedenya V.M., Dokurno G.S. The procedure for conducting a preliminary environmental analysis of organizations. *Ecological Bulletin*. 2011. N 1. P. 139-145 (in Russian).
10. Tsaruk A.Y. Methodological and organizational principles of preparatory ecological analysis of iron-ore mining and processing enterprises. *Economics of development*. 2013. N 3. P. 86-89 (in Russian).
11. Dubrovenko D. I., Starygin L. A., Lipunov I. N. Resource-saving technologies for recycling magnesium production waste. *Materials of the All-Russian scientific-practical conference of young scientists "Chemistry. Ecology. Urbanism"*. Perm: PNIPU. 2017. P. 477-484 (in Russian).
12. Bykov D.E. et al. Development of scientific grounds of the enterprises' waste management in the chemical and petrochemical industry. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016. Vol. 18. N 4-5. P. 886-892 (in Russian).
13. Sari M. The use of calcium sulfate in construction and the improvement of its properties. *Cement and its application*. 2009. N 2. P. 112-116 (in Russian).
14. Chernysh Y. et al. Phosphogypsum recycling: a review of environmental issues, current trends, and prospects. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. N 4. P. 1575.
15. Kochetkov A.V. et al. The arrangement of layers of transport structures from phosphogypsum semihydrate (waste by-product of the production of nitrogen-phosphorus fertilizers). *Transport structures*. 2019. Vol. 6. N 1. P. 1-10. DOI: 10.15862/18SATS119 (in Russian).
16. Zhantasov K.T. et al. Use of technogenic waste for box-type road surfacing. *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geoecology*. 2017. N 2(199). P. 170-175 (in Russian).

Поступила в редакцию 30.03.2025
Принята к опубликованию 13.04.2025

Received 30.03.2025
Accepted 13.04.2025