

## **Список использованных источников**

1. Thulukkanam K. Heat Exchanger Design Handbook. – London New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2013. – 1245 p.
2. Белоногов Н В., Пронин В. А. Расчет эффективности перекрестно-точных пластинчатых теплообменников. – Вестник МАХ. – 2004. – № 4(16). – С. 12–14.
3. Шевич Ю. А., Буртов С. Н. Проектный расчет пластинчато-рсбристых теплообменников с противоточно-прямоточным и перекрестноточным движением потоков: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. – 44 с.
4. Physics-based modelling of plate-fin heat exchangers // M. Grespan, A. Leonforte, L. Calò, M. Cavazzuti, D. Angeli / Energies. – 2025. – V. 18. – 34 p. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/3/495> (дата обращения 11.11.2025).
5. Справочник по теплообменным аппаратам / П. И. Бажан, Г. Е. Каневец, В. М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

УДК 330.342

**А.Н. Хотько**  
Филиал БГТУ БГКПСМ  
Минск, Беларусь

## **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ГИПСА СТЕКОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Аннотация.** Проведена экологическая оценка жизненного цикла (LCA) для управления отходами гипса, образующимися при нейтрализации растворов химической полировки хрустала. Проанализированы три сценария: захоронение ( $S_0$ ), использование в качестве замедлителя схватывания цемента ( $S_1$ ) и переработка в гипсовое вяжущее ( $S_2$ ). Установлено, что обязательная операция предварительной сушки влажного гипса определяет значительный рост энергозатрат и углеродного следа в сценариях переработки ( $S_1, S_2$ ).

**A.N. Khotko**  
Branch of BSTU BGKPSM  
Minsk, Belarus

## ENVIRONMENTAL LIFE CYCLE ASSESSMENT OF GLASS INDUSTRY GYPSUM WASTE UTILIZATION

*Abstract.* A life cycle assessment (LCA) was conducted to evaluate the environmental impact of managing fluorogypsum waste generated from the neutralization of crystal polishing solutions. Three scenarios were analyzed: landfill disposal (S0), use as a cement set retarder (S1), and processing into gypsum binder (S2). The study found that the mandatory pre-drying step for the wet gypsum significantly increases energy consumption and the carbon footprint in the recycling scenarios (S1, S2).

В Республике Беларусь проблема управления отходами, особенно промышленными, сохраняет свою остроту. Ежегодно в стране образуется свыше 50 000 тыс. тонн отходов производства. Основными источниками отходов являются предприятия строительной, химической, машиностроительной и энергетической отраслей. По данным официальной статистики, в Республике Беларусь в 2024 году образовано 55 348,0 тыс. тонн производственных отходов. Из них 17 827,0 тыс. тонн были использованы, что составляет 32,2 % от общего объема. Остальные отходы, а именно 38 483,0 тыс. тонн, были удалены (захоронение, хранение и обезвреживание).

Среди этих отходов можно выделить отходы гипса, образующиеся в результате нейтрализации растворов химической полировки хрустала.

В ходе процесса нейтрализации кислых стоков, при химической полировке хрустала, образуются гидратированные формы сульфата кальция. Данные отходы хранятся на открытых полигонах предприятия, что оказывает не благоприятное влияние на окружающую среду.

В рамках данного исследования ставилась задача установить экономически и экологически обоснованное решение по управлению отходами гипса, образующихся в результате нейтрализации кислых стоков, при химической полировке хрустала [1].

В таблице 1 представлен элементный состав исследуемых отходов гипса. Как видно из данных, основу материала формируют два ключевых компонента – оксид кальция (44,63 мас.%) и оксид серы в форме SO<sub>3</sub> (43,57 мас.%), что соответствует типичному составу кальцийсульфатных отходов. Высокая доля этих компонентов указывает на преобладание в структуре дигидрата или полуgidрата сульфата кальция, что важно учитывать при выборе методов дальнейшей переработки или возможного использования материала в технологических процессах.

**Таблица 1 – Оксидный состав исследуемых отходов гипса**

Содержание мас.%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	PbO	F
	0,29	2,78	0,02	44,63	0,31	43,57	0,45	7,40

Помимо основных составляющих, в отходах определяется значимое количество фтора (7,40 мас.%), который является наиболее проблемным элементом с точки зрения экологической безопасности. Меньшие концентрации оксидов алюминия, кремния, железа, калия, а также свинца (0,29–0,45 мас.%) свидетельствуют о наличии примесей, поступающих из исходного минерального сырья. Особую озабоченность вызывает содержание оксидов свинца, хотя его концентрация сравнительно невелика. Данный фактор также требует строгого контроля, так как тяжёлые металлы существенно ограничивают возможность безопасного применения гипса в сельском хозяйстве и строительстве без предварительной обработки. В совокупности представленный состав характеризует отход как сложный по химической природе материал, требующий специализированных технологий переработки и систем оценки экологических рисков.

На территории Республики Беларусь, данный тип отходов гипса может применяться для изготовления портландцемента, гипсового вяжущего.

Гипс, возникающий в результате нейтрализации отработанных растворов полировки хрустала, представляет собой техногенный гипс с характерным содержанием примесей, включая около 0,5 % свинца. В условиях ежегодного образования значительных объёмов таких отходов выбор оптимальной стратегии обращения с ними требует не только оценки технологической и экономической эффективности, но и анализа полного жизненного цикла (LCA). Выполненный анализ охватывает три возможные стратегии: (1) захоронение гипса на инженерном полигоне (S0), (2) использование его в качестве замедлителя схватывания портландцемента (S1) и (3) переработку в гипсовое вяжущее путём термической обработки (S2). Сравнительная оценка основана на функциональной единице «1 тонна гипса» и включает углеродный след, энергетические затраты и потенциальную токсичность, связанную с миграцией свинца [2].

Существенной особенностью отходов фторогипса, образующихся при нейтрализации растворов полировки хрустала, является высокая исходная влажность (около 40 %). Перед

вовлечением в переработку – как в качестве замедлителя твердения цемента либо сырья для гипсового вяжущего – материал должен пройти стадию предварительного обезвоживания и термической сушки. Включение этой операции оказывает значимое влияние на кумулятивные энергетические затраты и углеродный след.

Для удаления влаги с 40 % до технологически необходимого уровня ( $\approx$ 5–10 %) требуется испарить 300–350 кг воды на тонну исходного влажного фторогипса [3].

Теоретическая теплота испарения воды при 100 °C – 2257 кДж/кг. С учётом КПД промышленных сушильных установок (55–65 %) реальная энергозатрата составляет:

$$Q=300\text{--}350 \text{ кг} \times 2,257 \text{ МДж/кг} \div 0,60 \approx 1,1\text{--}1,3 \text{ ГДж/т сырья}$$

Это эквивалентно сжиганию примерно: 30–36 м<sup>3</sup> природного газа, или 33–38 л дизельного топлива, что соответствует выбросам  $\approx$ 60–75 кг CO<sub>2</sub>/т влажного отхода.

**Таблица 2 – Углеродный след анализируемых сценариев**

Сценарий	Транспортные выбросы CO <sub>2</sub> , кг/т	Выбросы CO <sub>2</sub> от сушки, кг/т	Итоговые выбросы, кг/т
S0 – захоронение	9	0	9
S1 – применение в цементе	19	60–75	79–94
S2 – получение гипсового вяжущего	70	60–75	130–145

Полученные данные демонстрируют, что именно операция сушки формирует основную долю углеродного следа в сценариях, предполагающих переработку гипса в продукцию. В частности, для варианта использования отходов в цементной промышленности совокупные выбросы CO<sub>2</sub> возрастают почти в четыре раза. В производстве гипсового вяжущего дополнительная сушка приводит к увеличению углеродного следа примерно в 1,8–2 раза, что делает данный этап критическим в контексте оценки устойчивости технологии.

Исследуемый гипс содержит около 0,5 % свинца, что требует оценки риска его потенциальной миграции в окружающую среду. Сушка, будучи процессом удаления воды, не снижает общей массы свинца, однако повышает концентрацию твёрдой фазы и улучшает структурную стабильность материала после переработки. В результате потенциальная миграция свинца определяется не процессом сушки, а

конечным способом обращения отхода. Минимальные риски наблюдаются при получении гипсового вяжущего, где ионы  $Pb^{2+}$  встраиваются в кристаллическую решётку дигидрата  $CaSO_4$ , что существенно снижает их подвижность.

Оценка миграционных рисков в расчёте на 1 т сухого продукта показала:

S0 – около 50 г Pb/t, наиболее неблагоприятный сценарий ввиду отсутствия стабилизации;

S1 – приблизительно 1 г Pb/t, за счёт включения в цементный камень;

S2 – около 5 г Pb/t.

Включение предварительной сушки во все перерабатывающие сценарии позволяет сделать несколько ключевых выводов.

Во-первых, переработка гипса сопряжена с существенным ростом энергопотребления, что приводит к увеличению углеродного следа по сравнению с простым захоронением. В то же время S0 остается наиболее неблагоприятным в экологическом плане из-за высокого риска миграции свинца и отсутствия ресурсосбережения.

Во-вторых, использование гипса в цементной промышленности (S1) показывает компромиссный характер: энергия сушки значительно увеличивает выбросы, однако тяжёлые металлы оказываются прочно иммобилизованы в структуре цементного камня.

Таким образом, влияние предварительной сушки является определяющим фактором в оценке устойчивости переработки гипса. Для повышения экологической эффективности перерабатывающих сценариев целесообразно внедрение низкотемпературных технологий сушки, использование вторичного тепла промышленных процессов или интеграция с энергоэффективными системами на возобновляемых источниках энергии.

Выполненный LCA-анализ показывает, что обращение с техногенным гипсом, образующимся в результате нейтрализации раствора полировки хрустала, требует интегрированного подхода, учитывающего его химический состав, энергетическую стоимость переработки и долгосрочные риски загрязнения окружающей среды. Установлено, что переработка гипса в продукты с добавленной стоимостью (замедлители цемента или гипсовые вяжущие) имеет значительные экологические преимущества по сравнению с захоронением. При этом выбор оптимального направления должен базироваться на сочетании факторов: доступности низкоуглеродной энергии, требований к токсической безопасности конечного продукта и инфраструктурных возможностей переработки.

## **Список использованных источников**

1. Ukaogo P.O., Ewuzie U., Onwuka C.V. Environmental pollution: causes, effects, and the remedies // Microorganisms for sustainable environment and health / P. Chowdhary, ed. – Amsterdam: Elsevier, 2020. – P. 419–429.
2. Singh J. International conference on harmonization of technical requirements for registration of pharmaceuticals for human use // J Pharmacol Pharmacother. – 2015. – Vol. 6, № 3. – P. 185–187.
3. Ram C., Kumar A. Municipal Solid Waste Management: Recent Practices // Nanobiotechnology for Green Environment. – CRC Press, 2021. – P. 37–65.

UDC 66.021.3

**R.I. Lankin, V.S. Frantskevich, Pan Yanxia,  
Shen Muying, Liu Zhikai**

Belarusian State Technological University  
Minsk, Republic of Belarus

## **INFLUENCE OF PACKING ELEMENT GEOMETRY ON MASS TRANSFER EFFICIENCY**

***Abstract.** The efficiency of mass transfer during CO<sub>2</sub> desorption using additive manufactured packing elements was investigated. Elements with surface cavities demonstrated superior performance compared to smooth elements due to increased turbulence and interfacial contact area. It was established that higher gas velocity and irrigation density enhance process efficiency. The results confirm the promising application potential of the developed elements in mass transfer equipment.*

**Р.И. Ланкин, В.С. Францкевич, Пань Янься,  
Шэнь Муин, Лю Чжикай**

Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Республика Беларусь

## **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ НАСАДОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАССОПЕРЕДАЧИ**

***Аннотация.** Исследована эффективность массопередачи при десорбции CO<sub>2</sub> с использованием аддитивных насадочных элементов. Элементы со впадинами показали преимущество над гладкими за счет роста турбулентности и площади контакта фаз. Установлено, что увеличение скорости газа и*